



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

DENES DE SOUZA BARROS

**EFEITOS DA SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS LENHOSOS DE PLANOS DE
MANEJO FLORESTAL DA AMAZÔNIA NAS CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO
VEGETAL SIDERÚRGICO**

**BELÉM
2021**

DENES DE SOUZA BARROS

**EFEITOS DA SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS LENHOSOS DE PLANOS DE
MANEJO FLORESTAL DA AMAZÔNIA NAS CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO
VEGETAL SIDERÚRGICO**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da
Amazônia, como parte das exigências do Curso
de Doutorado em Ciências Florestais: área de
concentração Ciências Florestais, para obtenção
do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira.
Coorientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio.

**BELÉM
2021**

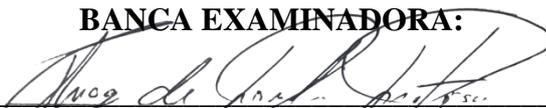
DENES DE SOUZA BARROS

**EFEITOS DA SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS LENHOSOS DE PLANOS DE
MANEJO FLORESTAL DA AMAZÔNIA NAS CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO
VEGETAL SIDERÚRGICO**

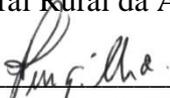
Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Ciências Florestais, área de concentração Ciências Florestais, para obtenção do título de Doutor.

Aprovado em 23 de dezembro de 2021

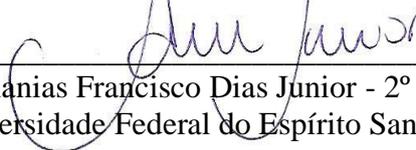
BANCA EXAMINADORA:



Dr. Thiago de Paula Protásio – Presidente/Coorientador
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA



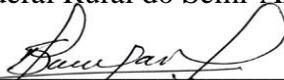
Dr. Paulo Fernando Trugilho – 1º Examinador
Universidade Federal de Lavras - UFLA



Dr. Ananias Francisco Dias Junior - 2º Examinador
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES



Dr. Mario Vanoli Scatolino – 3º Examinador
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA



Dr. Suelo Numazawa – 4º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

BARROS, DENES DE SOUZA
EFEITOS DA SEGREGAÇÃO DE RESÍDUOS LENHOSOS DE PLANOS DE MANEJO
FLORESTAL DA AMAZÔNIA NAS CARACTERÍSTICAS DO CARVÃO VEGETAL SIDERÚRGICO /
DENES DE SOUZA BARROS. - 2021.
97 f. : il. color.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira Oliveira
Coorientador: Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio.

1. biomassa residual. 2. agrupamento de espécies. 3. análises térmicas. 4. autocombustão. 5.
heterogeneidade. I. Oliveira, Francisco de Assis Oliveira, *orient.* II. Título

CDD 621.042

DEDICATÓRIA

*À minha Família, minha esposa Ariene Barros e
meu filho Miguel Barros, que foram e são os
alicerces da minha cainhada. Tudo por vocês!*

AGRADECIMENTOS

A Deus pai criador da vida, pela força diária proporcionada, por tudo que me permitiu vivenciar e conhecer até aqui.

À minha mãe Deusa Barros pelos cuidados, pelas orações, por tudo que fez e sacrificou para poder chegar onde cheguei.

À minha segunda mãe tia Creusse Barros, obrigado por sempre cuidar dos seus sobrinhos, lhe amo sempre.

A meu eterno Tio-Pai Eurico do Pilar Barros, sua força e seu compromisso com a família jamais serão esquecidos. De onde você estiver, sei que estás a nos proteger.

À minha irmã Danielle Barros e aos meus sobrinhos Douglas, Junior e Ana, por sempre permitirem momentos felizes.

Esta Tese é resultado de projeto financiado pelo Banco da Amazonia (contrato de apoio financeiro BASA/UFRA 2018/193), CNPq (Processo 306793/2019-9) e CAPES (código do financiamento 001), em parceria com o Grupo Keilla. Além disso, contamos com apoio da Universidade Federal de Lavras (Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia de Biomassa), Universidade Federal de Viçosa (Laboratório de painéis e Energia da Madeira) e a UFRA Campus Belém em especial aos integrantes do Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

À universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, em especial a coordenadora Lina Bufalino.

Aos colegas de batalha do Doutorado pelas diversas emoções vividas: Rodrigo, Ulisses, Jonas, Elizana, Mayara, Sabrina; os bons momentos sempre serão lembrados. Um grande abraço turma.

Ao professor, mestre Thiago Protasio. Pelo entusiasmo constante, pela oportunidade e cuidado dispensado, pela grande ajuda prestada, por tudo que fez por mim nesses poucos anos que tivemos contato. Sem você não teria conseguido chegar até o final dessa estrada. Muito obrigado! E a toda sua equipe de pesquisa, orientados e todos que fizeram parte dessa missão.

Ao professor, mestre Francisco de Assis. Seu carisma e modo de pensar jamais será esquecido. Obrigado pela oportunidade e cuidado dispensado, pela grande ajuda prestada, por tudo que fez por mim nesses poucos anos que tivemos contato. Muito Obrigado!

Ao amigo Michael Douglas, sempre se destacou quando aluno e hoje constato o excelente profissional que se tornou. Você foi muito importante nessa caminhada. Obrigado por tudo meu amigo. "Tamo junto"

Aos amigos de longa data e engenheiros florestais, que a graduação da UFRA me deu pra vida: Stone, Aninha, Alexandre, Bruno, Aristeu, Ronaldo...

A todos os Professores do Instituto de Ciência Agrárias (ICA/UFRA) que sempre abriram as portas para novas ideias e novos trabalhos: Sueo Numazawa, Eduardo Rocha, Paulo Contente, Manuel Sebastião, João Olegário, Marcela Silva, Gracialda Ferreira, Antônio Moreira, Izildinha Miranda, José Natalino, Lina Bufalino, Rodrigo Geroni; o meu muito obrigado. Vocês foram muito importantes nessa etapa e agradeço muito a todos. Muito obrigado!

A todos os colegas professores do Campus UFRA de Paragominas. Em especial a eterna amiga Simonne Sampaio; e Emilene Santos, que sempre me incentivaram e que hoje torcem por mim do outro plano. “Sisi” e “Bonita” vocês deixaram saudades.

RESUMO GERAL

Embora os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável seja uma alternativa promissora para o abastecimento da produção de carvão vegetal na Amazônia Brasileira, essa biomassa e o carvão derivado apresenta qualidade variável. A segregação das madeiras já se mostrou ser uma alternativa importante para o aumento da produtividade e rendimento em carvão vegetal na unidade produtora, pois promove a homogeneização da matéria prima enfiada. Contudo, esse estudo visa estudar os efeitos da segregação dos resíduos madeireiros na qualidade, combustibilidade e ocorrência da autocombustão em carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria no Estado do Pará. Assim, foram adotados 4 grupos de madeiras com propriedades similares segregadas com base na análise de componentes principais. Um quinto grupo foi considerado, representando a forma tradicional de carbonização na região. Esse grupo foi composto por vinte e três espécies. O estudo da qualidade do carvão foi baseado nas propriedades físicas (densidade relativa aparente e umidade), mecânicas (friabilidade), química (conteúdos de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas) e energéticas (poder calorífico superior e densidade energética). Os parâmetros analisados na combustão foram: temperatura de ignição, temperatura de burnout, temperatura máxima, taxa máxima de combustão, taxa média de combustão e tempo de ignição. Os índices característicos da combustão, de ignição e de inflamabilidade foram estudados. O estudo revelou que a segregação de madeiras residuais culminou na elevação da qualidade do carvão vegetal produzido nos fornos de alvenaria, especialmente quanto a densidade relativa aparente, friabilidade, teor de cinzas, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e densidade energética. O grupo 1, formado por carvões de resíduos da espécie *D. excelsa*, apresentou os melhores valores de densidade ($0,737 \text{ g cm}^{-3}$), teor de cinzas (1,20%), poder calorífico ($28,9 \text{ MJ kg}^{-1}$) e densidade energética ($21,3 \text{ MJ m}^{-3}$). Em contraste, a carbonização convencional se mostrou muito variável, com carvões mais friáveis e menos resistentes. Carvões do grupo 1 apresentaram as maiores temperatura de ignição (380°C), temperatura de burnout (547°C), temperatura em que ocorre maior perda de massa (515°C) e tempo de ignição (33,39 min). O grupo 5 produziu carvões com baixa temperatura de ignição ($361,65^\circ\text{C}$) e baixa taxa máxima de combustão ($9,54 \text{ \% min}^{-1}$), indicando uma maior dificuldade de queima. Dois grupos de carvões não apresentaram autocombustão (1 e 4), o que demonstra que a segregação pode reduzir a incidência de combustão espontânea do carvão vegetal. Por outro lado, os carvões dos grupos 2, 3 e 5 (carbonização tradicional) entraram em autocombustão. Portanto, a segregação das madeiras residuais promoveu resultados positivos quanto a qualidade, combustibilidade e combustão espontânea de carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria.

Palavras-chave: biomassa residual, heterogeneidade, agrupamento de espécies, química imediata, análises térmicas, autocombustão.

GENERAL ABSTRACT

Although wood wastes from sustainable forest management are a promising alternative for supplying charcoal production in the Brazilian Amazonia, this biomass and derived charcoal present a heterogeneous quality. The segregation of wood proved to be an important alternative to increase the productivity and yield of charcoal in the production unit, as it promotes the homogenization of the raw material inside the kiln. However, this study aims to study the effects of wood waste segregation on the quality, combustibility, and occurrence of spontaneous combustion in charcoal produced in brick kilns in the State of Pará. Thus, 4 groups of woods with similar properties segregated based on the principal components analysis were adopted. In addition, a fifth group was considered, the traditional form of carbonization in the region. This group was composed of twenty-three species. The study of charcoal quality was based on physical (bulk density and moisture), mechanical (friability), chemical (fixed carbon content, volatile materials, and ash), and energy (higher heating value and energy density) properties. The parameters analyzed in combustion were ignition temperature, burnout temperature, maximum temperature, maximum combustion rate, average combustion rate, and ignition time. The combustion characteristic index, ignition index, and flammability index were the studied indices. The study revealed that the segregation of residual wood culminated in an increase in the charcoal quality produced in brick kilns, especially regarding bulk density, friability, ash content, fixed carbon content, higher heating value, and energy density. Group 1, formed by charcoal from wastes of the *D. excelsa* species, presented the best values for bulk density (0.737 g cm^{-3}), ash content (1.20%), higher heating value (28.9 MJ kg^{-1}), and energy density (21.3 MJ m^{-3}). On the other hand, conventional carbonization proved to be very variable, resulting in more friable and less resistant charcoal. Charcoals from group 1 had the highest ignition temperature (380°C), burnout temperature (547°C), temperature at which the greatest loss of mass occurs (515°C) and ignition time (33.39 min). Group 5 produced charcoals with low ignition temperature (362°C) and low maximum combustion rate (9.54 \% min^{-1}). Two groups of charcoal did not show spontaneous combustion (1 and 4), which demonstrates that segregation can reduce the occurrence of this phenomenon. On the other hand, charcoals from groups 2, 3 e 5 (traditional carbonization) showed samples with spontaneous combustion. Therefore, the segregation of wood waste promoted positive results in terms of quality, combustibility, and spontaneous combustion of charcoal produced in brick kilns.

Keywords: residual biomass, heterogeneity, species grouping, proximate analysis, thermal analysis, spontaneous combustion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Forno de Carbonização do tipo “rabo quente”	16
Figura 2 -	Forno de carbonização do tipo "forno de encosta".....	17
Figura 3 -	Forno de carbonização do tipo "forno de superfície".....	18
Figura 4 -	Forno de carbonização do tipo "forno retangular".....	19
Figura 5 -	Forno de carbonização do tipo “MF1-UFV”, vista geral.....	20
Figura 6 -	Sistema forno fornalha.....	21
Figura 7 -	Manual de Ensaio e Critérios de Recomendação sobre o Transporte de Mercadorias Perigosas.....	31
Capítulo 1		
Figura 8 -	Localização da unidade de produção de carvão vegetal da Fazenda Rio Capim, localizada na cidade de Paragominas, Estado do Pará.....	45
Figura 9 -	Grupos de espécies definidos pela análise de componentes principais visando a carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	46
Figura 10 -	Grupos de espécies segregados para a carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.....	49
Figura 11 -	Metodologia de amostragem do carvão – Caixa metálica vazia adotada na amostragem (A); Caixa metálica com todo o carvão vegetal produzido em um forno (B); Tábuas apregoadas na região frontal da caixa (C); e Amostragem do carvão na caixa metálica de forma aleatória.....	50
Figura 12 -	Densidade relativa aparente (DRA) dos carvões vegetais de madeiras residuais por grupo de espécies. Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.....	53
Figura 13 -	Relação entre a densidade básica ponderada das madeiras (DBp) e a densidade relativa aparente do carvão vegetal de grupos de	

	espécies segregadas e não segregadas por forno de alvenaria.....	54
Figura 14 -	Densidade relativa aparente dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D) e 5 (E) por forno de alvenaria.....	55
Figura 15 -	Friabilidade dos carvões vegetais de madeiras residuais por grupo de espécies. Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.....	56
Figura 16 -	Friabilidade dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D) e 5 (E) por forno de alvenaria.....	58
Figura 17 -	Análise química imediata dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1, 2, 3, 4 e 5 por forno de alvenaria. Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.....	59
Figura 18 -	Poder calorífico superior (A) e densidade energética dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1, 2, 3, 4 e 5 por forno de alvenaria. Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.	61
Capítulo 2		
Figura 19 -	Localização da carvoaria da Fazenda Rio Capim, localizada na cidade de Paragominas, Estado do Pará.....	70
Figura 20 -	Grupos de espécies para a carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	71
Figura 21 -	Curvas termogravimétricas dos carvões de grupos de espécies produzidos em fornos de alvenaria.....	76
Figura 22 -	Curva DTG dos carvões vegetais de grupos de espécies produzidos em fornos de alvenaria.....	77
Figura 23 -	Análise térmica diferencial da combustão dos grupos de carvões vegetais.....	79

Figura 24 -	Relações entre a temperatura de máxima liberação de energia (DTA) e temperatura de burnout (T_b), temperatura de máxima perda de massa ($T_{máx}$), tempo de pico – máxima perda de massa (t_p), temperatura de ignição (T_i) e tempo de ignição (t_{ig}).....	82
Figura 25 -	Relações entre as variáveis da combustão de carvões vegetais de grupos de espécies nativas da Amazônia. DTA - temperatura máxima de liberação de energia; T_b - temperatura de Burnout; $T_{máx}$ - temperatura de máxima perda de massa; t_p - tempo de pico – máxima perda de massa; T_i - temperatura de ignição; e t_{ig} - tempo de ignição.....	83
Figura 26 -	Análise da combustão espontânea de carvões vegetais de grupos de espécies carbonizadas em fornos de alvenaria.....	84
Figura 27 -	Temperaturas de burnout e ignição dos carvões vegetais. Círculos pretos indicam os carvões que entraram em combustão espontânea e os círculos em vermelho representam os carvões que não entraram em combustão espontânea.....	85

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1		
Tabela 1 -	Espécies amostradas para carbonização nos fornos de alvenaria da Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	47
Tabela 2 -	Classificação da friabilidade do carvão vegetal.....	51
Capítulo 2		
Tabela 3 -	Lista de espécies utilizadas na carbonização em fornos de alvenaria da Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	72
Tabela 4 -	Grupos de espécies segregadas para a carbonização na carvoaria da Fazenda Rio Capim, cidade de Paragominas, Estado do Pará, Brasil.....	73
Tabela 5 -	Análise química imediata dos carvões vegetais de madeiras residuais segregadas em grupos de espécies.....	74

Tabela 6 -	Perda de massa dos carvões vegetais em porcentagem por faixas de temperaturas durante o processo de combustão.....	78
Tabela 7 -	Parâmetros da combustão dos grupos de carvões vegetais.....	80
Tabela 8 -	Índices da combustão dos grupos de carvões vegetais.....	81

SUMÁRIO

1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	12
2	OBJETIVO GERAL.....	13
3	QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3.1	Capítulo 1.....	13
3.2	Capítulo 2.....	14
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
4.1	A carbonização no Brasil.....	14
4.2	Principais fornos utilizados no Brasil.....	15
4.2.1	Forno rabo quente.....	15
4.2.2	Forno de encosta.....	16
4.2.3	Forno de circular.....	17
4.2.4	Forno retangular.....	18
4.2.5	Forno MF1-UFV.....	19
4.2.6	Forno acoplado a fornalha.....	20
4.2.7	Fornos metálicos.....	21
4.3	Processo de carbonização.....	22
4.4	Potencial dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal.....	24
4.5	Propriedades do carvão vegetal destinados ao uso doméstico e industrial.....	26
4.6	Estudo da combustibilidade e combustão espontânea do carvão vegetal.....	27
	REFERÊNCIAS.....	31
5	CAPÍTULO 1 – QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO POR MEIO DA SEGREGAÇÃO DOS RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	42
5.1	Introdução.....	42
5.2	Material e métodos.....	45
5.2.1	Origem do material biológico.....	45

5.2.2	Segregação dos resíduos madeireiros para produção de carvão vegetal.....	45
5.2.3	Cubagem rigorosa e densidade básica ponderada dos resíduos.....	48
5.2.4	Esquema de carbonização em fornos de alvenaria.....	48
5.2.5	Amostragem dos carvões vegetais produzidos nos fornos de alvenaria.....	45
5.2.6	Qualidade do carvão vegetal.....	50
5.2.7	Análises estatísticas.....	51
5.3	Resultados e discussão.....	52
5.3.1	Efeito da segregação na densidade relativa aparente do carvão vegetal.....	52
5.3.2	Efeito da segregação na friabilidade do carvão vegetal.....	56
5.3.3	Efeito da segregação na constituição química imediata do carvão vegetal.....	59
5.3.4	Efeito da segregação nas propriedades energéticas do carvão vegetal.....	60
5.4	Conclusões.....	62
	Referências.....	62
6	CAPÍTULO 2 – COMBUSTIBILIDADE DOS CARVÕES VEGETAIS PRODUZIDOS A PARTIR DA SEGREGAÇÃO DOS RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	67
6.1	Introdução.....	68
6.2	Material e métodos.....	70
6.2.1	Origem do carvão vegetal.....	70
6.2.2	Segregação das madeiras residuais para carbonização nos fornos de alvenaria.....	70
6.2.3	Amostragem do carvão vegetal.....	73
6.2.4	Qualidade do carvão vegetal.....	74
6.2.5	Análises térmicas dos carvões.....	74
6.2.6	Teste de não combustão espontânea dos carvões.....	75
6.2.7	Análises estatísticas.....	76
6.3	Resultados e discussão.....	76
6.3.1	Perfil térmico dos carvões vegetais.....	76
6.3.2	Autocombustão do carvão vegetal.....	83
6.4	Conclusões.....	86
	Referências.....	86
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	91

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O uso de fontes de energias limpas constitui uma excelente estratégia de diversificação da matriz energética, tornando-a mais sustentável devido a redução da dependência de combustíveis fósseis, como o carvão mineral (UDDIN et al., 2019). A produção bioenergética vai ao encontro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) publicados em 2015 pela Organização das Nações Unidas, que prevê a garantia de energia limpa e acessível a todos e a mitigação das mudanças climáticas até 2030 (ONU, 2015).

A madeira é uma importante fonte energética utilizada no Brasil, especialmente para produção de carvão vegetal visando ao abastecimento das indústrias siderúrgicas (BRITO, 2007; JUIZO et al., 2017). Na região Norte do país, principalmente no estado do Pará, discute-se a necessidade de ampliação das florestas plantadas com espécies do gênero *Eucalyptus* para atender a demanda dessas indústrias. O Pará apresenta 154.402 hectares de florestas plantadas de *Eucalyptus* (IBÁ, 2020). Dada a insuficiência de matéria prima para abastecer o polo siderúrgico da região do Carajás, localizado entre os estados do Maranhão e do Pará, são necessárias fontes alternativas e seguras para produção desse importante insumo industrial, como os resíduos do manejo florestal sustentável e do processamento mecânico de toras. A geração de energia a partir de resíduos da madeira pode ser considerada atividade neutra, já que o CO₂ emitido é o mesmo absorvido anteriormente para composição da biomassa (EPE, 2018a).

Os resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável são promissores para a produção de carvão vegetal com qualidade adequada para a redução do minério de ferro (LIMA et al., 2020a; LIMA et al., 2020b; LIMA et al., 2021). Contudo, a problemática da heterogeneidade das propriedades físicas e químicas dessa matéria prima reduz o potencial energético dessa biomassa e dificulta o processo de carbonização. A heterogeneidade desses resíduos também está relacionada a sua origem, pois são oriundos de galhos, restos de troncos não aproveitados após a colheita do fuste e sapopemas (FRANCEZ et al., 2007). Após o abate das árvores, esses resíduos são estocados dentro das florestas pela maioria dos detentores de planos de manejo, pois o principal produto é o fuste que é direcionado para as serrarias e laminadoras. Por outro lado, alguns empreendedores retiram essa matéria prima da floresta após um ano da colheita para produção de carvão vegetal. Essa fonte de biomassa desponta como fonte promissora para produção de carvão vegetal devido sua qualidade e disponibilidade local.

No estado do Pará, as empresas que utilizam essa biomassa, ainda não seguem critérios de separação desses resíduos, ou seja, carbonizam conjuntamente muitas espécies.

Pereira et al. (2020) já alertavam para a separação das madeiras residuais visando à maximização da produção energética na região norte do país. Pesquisas recentes qualificaram as madeiras (LIMA et al., 2020a) e os carvões vegetais produzidos em escala de laboratório (LIMA et al., 2020b) para bioenergia. Lima (2020) demonstrou em sua pesquisa que a segregação dos resíduos promove a melhoria dos índices de produtividade e rendimento da carvoaria. Assim discute-se a necessidade de estudar a qualidade, comportamento térmico e eventual possibilidade de autocombustão dos carvões vegetais produzidos com essa fonte de biomassa.

A autocombustão do carvão vegetal pode ocorrer durante a carbonização, quando não há controle por parte do operador, após o fim do ciclo de carbonização, quando o resfriamento do carvão é feito de maneira inadequada e durante o transporte até as siderúrgicas, culminando em incêndios em cargas nas rodovias (DIAS et al., 2002; ROHDE, 2005). Esclarecer os principais fatores que influenciam a autocombustão do carvão vegetal e as espécies que não apresentam essa característica configuram-se importantes lacunas científicas a serem estudadas e baseará diretrizes para o futuro das carbonizações com resíduos de madeiras tropicais e transporte de biorredutor siderúrgico.

A presente tese está dividida em dois capítulos. O primeiro aborda os efeitos da segregação da biomassa residual do manejo florestal sustentável, em condições industriais, sob a qualidade do carvão vegetal. O segundo capítulo aborda a combustibilidade e a ocorrência de autocombustão em carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria.

Esse trabalho faz parte do projeto “Valorização de biomassas residuais provenientes de manejo florestal sustentável para geração de bioenergia na Amazônia Legal”, que é financiado pelo Banco da Amazônia sob Contrato de Apoio Financeiro Nº 2018/193 (2019 – 2021).

2 OBJETIVO GERAL

Estudar os efeitos da segregação dos resíduos madeireiros na qualidade, combustibilidade e ocorrência da autocombustão em carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria no Estado do Pará.

3 QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.1 Capítulo 1

1. Questão: Como a segregação da madeira pode influenciar na qualidade dos carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria?

Hipótese: A segregação melhora as propriedades físicas e químicas dos carvões vegetais devido à utilização de matéria prima de qualidade similar.

Objetivo: Comparar as propriedades dos carvões vegetais produzidos com madeiras residuais segregadas e não segregadas (procedimento tradicional das carvoarias).

3.2 Capítulo 2

1. Questão: Como a segregação da madeira pode influenciar a combustibilidade e combustão espontânea dos carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria?

Hipótese: A segregação das madeiras pode influenciar a combustibilidade dos carvões (maneira como o carvão reage durante a combustão). Espera-se que a combustibilidade seja influenciada diretamente pela composição química dos carvões.

Objetivo: Estudar a combustibilidade e combustão espontânea dos carvões vegetais produzidos com madeiras residuais segregadas e não segregadas em grupos.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 A carbonização no Brasil

O Brasil apresenta a maior produção mundial de carvão vegetal, em torno de 12% (IBÁ, 2020). A maior parte da produção nacional de carvão vegetal no ano de 2019 (73,8%), foi destinada para a produção de ferro gusa e aço (EPE, 2020). Neste segmento, a energia utilizada é proveniente de coque (42,7%), carvão vegetal (18,2%), eletricidade (9,6%), gás natural (7,5%), gás de coqueria (7,1%) e outros (14,9%) (EPE, 2020). Diante desse cenário, a ampliação dos plantios florestais e emprego de madeiras residuais do manejo florestal sustentável, como sapopemas, galhos e restos de troncos, são estratégias importantes para a produção de carvão vegetal de natureza renovável para a siderurgia, especialmente na região Norte e Nordeste do país, onde está localizado o segundo maior polo siderúrgico do Brasil (UHLIG et al., 2008).

No país, a maior parte dos polos produtores de carvão vegetal não conta com metodologias de carbonização modernas, tampouco com controle de qualidade da produção. Essas falhas são causadas pela utilização de técnicas e equipamentos rudimentares, o que pode afetar o rendimento da produção e as emissões de gases poluentes advindo do processo de carbonização (CARVALHO et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2013).

A utilização de fornos com baixo nível tecnológico não é uma exclusividade da indústria brasileira. Alguns países do continente africano que se destacam em termos de produção de carvão vegetal com finalidade doméstica, como Nigéria, Etiópia, Uganda, Quênia, Zâmbia e Gana, utilizam fornos de carbonização com características primitivas, de

baixa eficiência e com pouco, ou nenhum, controle do processo. Nesse modelo de carbonização, a produção do carvão é baseada unicamente na experiência do carbonizador (FAO, 2017; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019). O desafio chave é aumentar a eficiência do processo de carbonização, reduzindo a quantidade de lenha utilizada para produzir a mesma quantidade de carvão vegetal e os gases do efeito estufa. Investimentos em tecnologias melhoradas relacionadas a forno, como uso de fornos metálicos ou de alvenaria, para o continente africano é dificultado dado a baixa aceitação, elevado investimento financeiro associado, falta de formação entre os produtores de carvão, inadequação de algumas técnicas de forno para contextos locais e falta de estruturas institucionais para promover práticas de carbonização mais eficientes (SCHURE et al., 2021).

Estima-se que 80% da produção brasileira de carvão vegetal ainda são realizadas em fornos rudimentares de alvenaria (BAILIS et al., 2013). Devido ao baixo nível tecnológico, apresentam baixo rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Os fornos são construídos em superfície com tijolos, cimento e argila, podendo conter agente com propriedades aditivas (açúcar ou silicato de sódio) visando elevar a vida útil e reduzir possíveis ocorrências de fissuras nas paredes (CARNEIRO et al., 2013; GOMES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2013). A escolha do sistema de produção de carvão vegetal é justificada pelo menor custo relacionado a construção e manutenção, uma vez que apresenta arquitetura simples. O conhecimento sobre o formato do forno e suas dimensões são essenciais, pois interferem diretamente no rendimento e no período de carbonização, necessitando sempre de operadores experientes (OLIVEIRA et al., 2017).

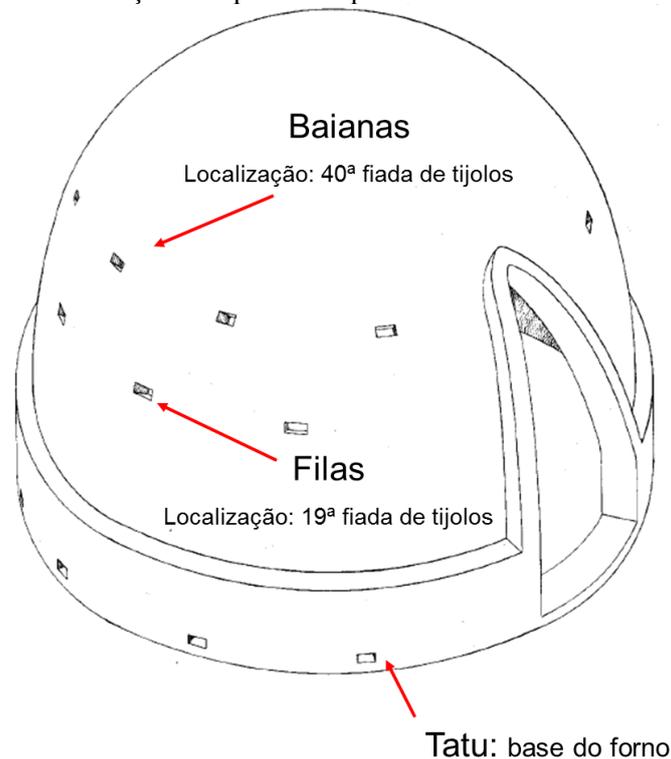
4.2 Principais fornos utilizados no Brasil

4.2.1 Forno rabo quente

O forno conhecido popularmente pelo nome *rabo quente* é o principal utilizado nas carvoarias (Figura 1). É um forno de superfície, possui arquitetura simples e contém uma entrada principal destinada ao carregamento e descarregamento. Ao longo de sua parede, existem pequenas aberturas que servem para o controle do oxigênio, permitindo assim a entrada e saída de ar. Através dessas mesmas aberturas, os gases oriundos do processo de carbonização são liberados. A vantagem desse tipo de forno está na fácil construção, no baixo custo de manutenção, não necessita de mão de obra com alto nível de qualificação. Por outro lado, a emissão de gases poluentes, o baixo rendimento gravimétrico, a difícil mecanização em seu interior, o baixo nível tecnológico e o processo empírico, são as principais

desvantagens desse modelo de carbonização (CARNEIRO et al., 2013; PINHEIRO, 2006; SILVA et al., 2014).

Figura 1 - Forno de Carbonização do tipo “rabo quente”.

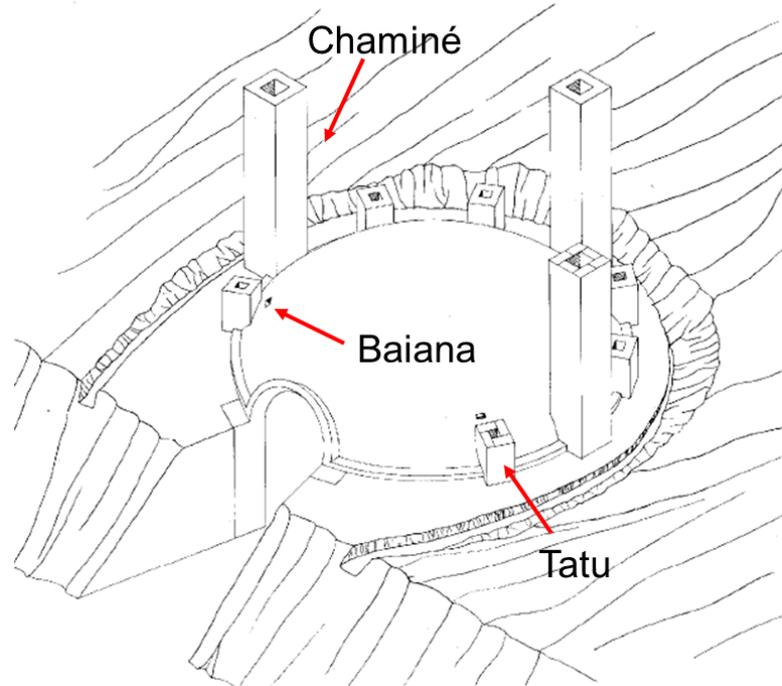


Fonte: CETEC (1982).

4.2.2 Forno de encosta

Em algumas regiões do país, em que há a presença de áreas acidentadas, são comuns a presença de fornos de encosta (Figura 2), a construção desse tipo de forno aproveita os níveis do relevo e utiliza-o como parede, o que conseqüentemente reduz a quantidade de material necessário para sua construção. Esse tipo de forno pode conter de uma a três chaminés, além da entrada principal. Por ser uma estrutura construída diretamente no solo, há menores perdas térmicas, o que afeta positivamente a eficiência da carbonização refletindo em um maior rendimento gravimétrico, o que pode ser considerado uma vantagem se comparado ao forno do tipo *rabo quente*, no entanto, o resfriamento pode ser mais lento, prolongando o período de produção, e é uma construção que depende de áreas acidentadas (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

Figura 2 - Forno de carbonização do tipo "forno de encosta".

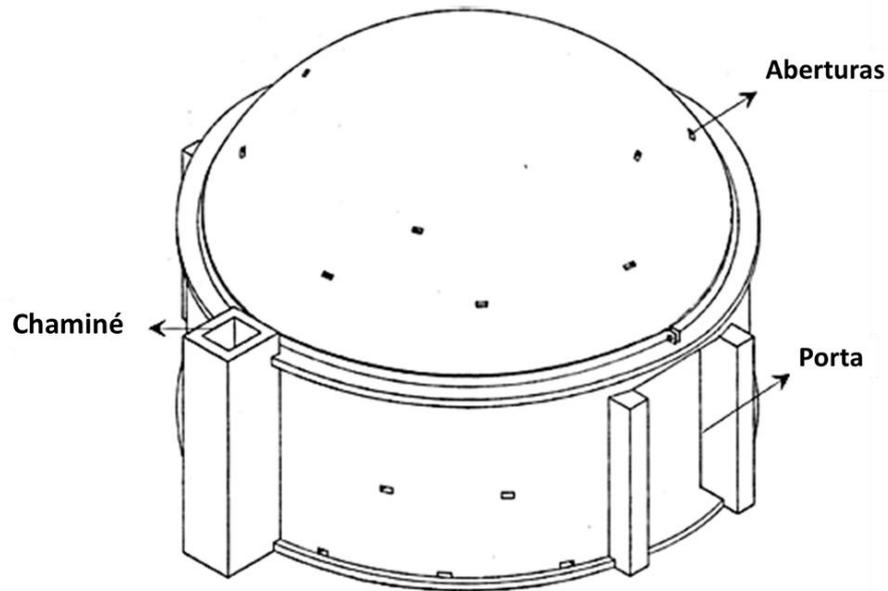


Fonte: CETEC (1982).

4.2.3 Forno circular

Outros fornos surgiram como resultado de melhorias dos fornos mais rústicos, como por exemplo o forno de superfície (Figura 3), também conhecido como colmeia. Esse tipo de forno possui estrutura semelhante à do forno *rabo quente*. No entanto, o que diferencia um forno do outro é a presença da chaminé em sua lateral com tiragem central, inserida com o objetivo de melhorar o fluxo internos dos gases gerado no processo de pirólise. Esse tipo de forno pode apresentar de uma a duas aberturas de carregamento, que serve como pontos de entrada de ar, sua arquitetura permite que a carbonização seja realizada de maneira mais uniforme, o que consequentemente melhora no rendimento e na eficiência (ARRUDA et al., 2011; SOUZA et al., 2016).

Figura 3 - Forno de carbonização do tipo "circular".

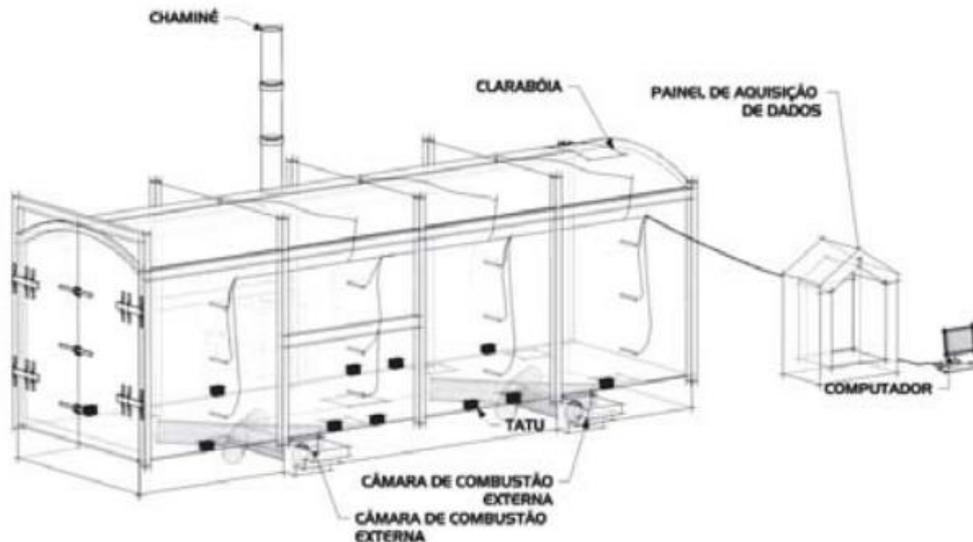


Fonte: Rodrigues & Braghini Junior (2019).

4.2.4 Forno retangular

Com as melhorias nas metodologias de produção, principalmente em busca de fornos mais sustentáveis, com maiores capacidades de carga, com maior eficiência, e que permitissem a mecanização e tornasse o procedimento cada vez mais autônomo, surgiram os fornos retangulares (Figura 4). Esse tipo de forno possui uma câmara externa de combustão, no qual é um anexo que por um canal de ligação faz integração com o forno principal. Esse anexo serve principalmente como controlador do fluxo de ar, no qual também circulam os gases aquecidos. A partir desta canalização é possível realizar e controlar o processo de carbonização de maneira mais eficiente (CARNEIRO et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2020). Algumas empresas vêm testando equipamentos que possa facilitar o monitoramento do processo de carbonização, entre eles os medidores de temperatura ao longo da extensão do forno, como uma forma de se obter a carbonização mais homogênea e conseqüentemente maior rendimento gravimétrico (GUIMARÃES NETO et al., 2007; SANTOS et al., 2017).

Figura 4 - Forno de carbonização do tipo "forno retangular".



Fonte: Arruda et al. (2011).

4.2.5 Forno MF1-UFV

Além dos avanços citados anteriormente, houve também grande interesse por partes das instituições privadas em parceria com as instituições públicas que visavam melhorias substanciais ou a criação de novos fornos de carbonização. Diante dessa necessidade, surgiu o forno MF1-UFV (Figura 5), projeto desenvolvido entre a Universidade Federal de Viçosa e a empresa ArcelorMittal Bioenergia. Assim como o forno retangular comum, o MF1-UFV é anexado a uma fornalha, na qual é realizada a queima dos gases emanados do processo de carbonização. No entanto sua estrutura é bem mais sofisticada, possuindo pilares e vigas de sustentação (podendo ser construída de aço ou concreto armado) que conferem maior resistência. Esses fornos apresentam quatro entradas de ar com instrumentos que controlam o fluxo de ar no interior do forno. O MF1-UFV, além de permitir melhor controle do processo, permite maior controle da emissão dos gases liberados durante a carbonização (CARDOSO et al., 2010; CARVALHO et al., 2012).

Figura 5- Forno de carbonização do tipo “MF1-UFV”, vista geral.

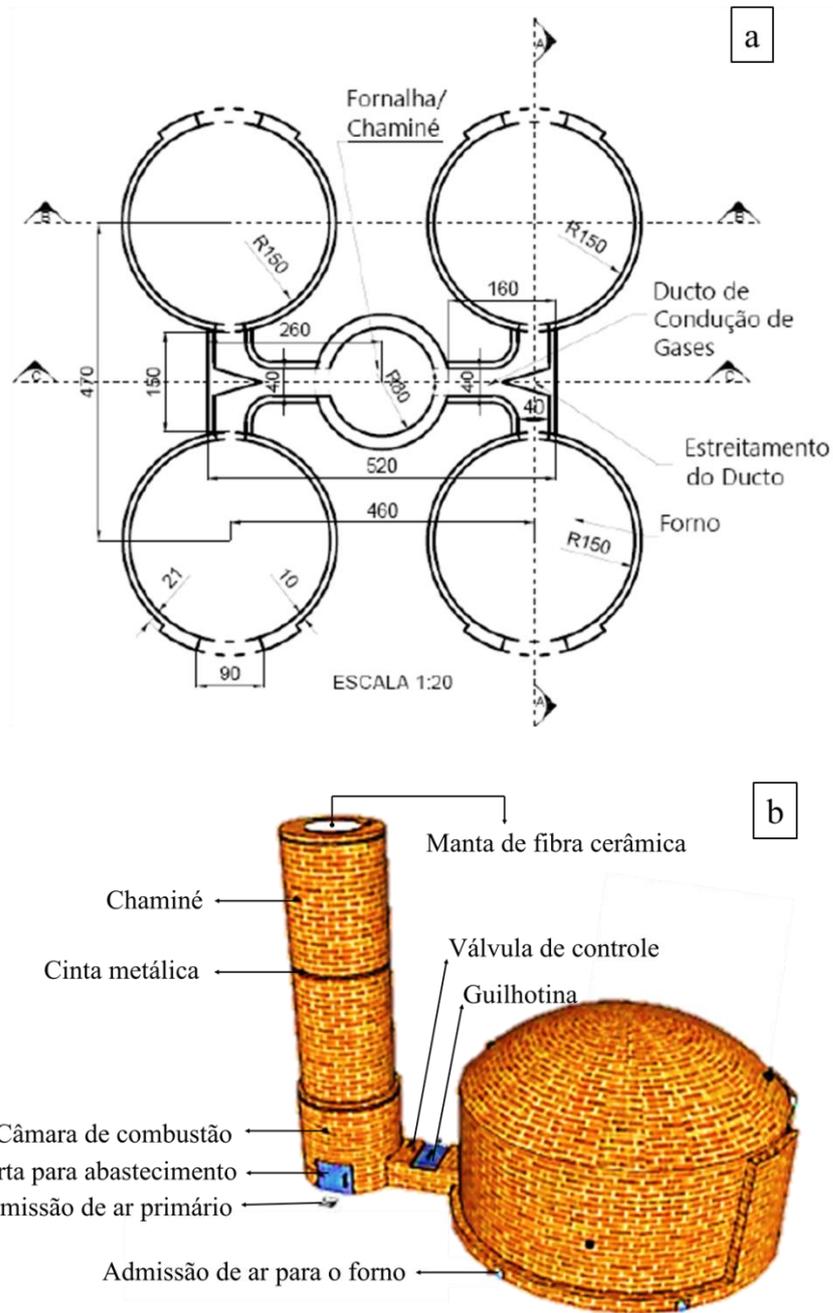


Fonte: Cardoso et al. (2010).

4.2.6 Forno acoplado a fornalha

Além desses fornos, existem outras adaptações, consideradas avançadas, principalmente do ponto de vista ambiental, um sistema fornos-fornalha. Trata-se de quatro fornos circulares, acoplados a uma fornalha que permite a queima dos gases decorrentes do processo de carbonização (Figura 6). Esse tipo de forno se diferencia dos demais pela presença de dúcteis no qual os gases gerados no processo de pirolise são conduzidos pela pressão negativa gerada pela chaminé até a fornalha principal (no qual é integrada por uma câmara de combustão, chaminé, sistema de entrada dos gases e admissão de ar primário), por onde esses gases são posteriormente queimados. O objetivo dessa fornalha é de reduzir a emissão desses poluentes que seriam diretamente liberados para a atmosfera e transformar a poluição em energia térmica (DAMÁSIO et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2013; SANTOS et al., 2017).

Figura 6 - Sistema fornos-fornalha.



Fonte: Oliveira et al. (2013) e Donato et al. (2020).

4.2.7 Fornos metálicos

Em algumas matrizes industriais a utilização de fornos em alvenaria foi substituída por outros mais evoluídos, denominados de reatores metálicos, por serem eficientes na produção de carvão vegetal, devido o maior controle do processo, o que conseqüentemente reflete diretamente no rendimento, tempo de carbonização, tempo de resfriamento e na qualidade do

carvão produzido (FIGUEIRÓ et al., 2019). Além dos benefícios inerentes a produção, eles também são conhecidos pela importância ambiental devido o controle de gases emitidos durante o processo de carbonização. O sistema do forno é integrado a queimadores de gases, eliminando maior parte dos agentes nocivos ao meio ambiente (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012).

A maioria dos fornos metálicos permite o aproveitamento de coprodutos oriundos do processo de carbonização, por meio de um sistema integrado de recuperação, que capturam os gases, a fumaça além do licor pirolenhoso, agregando valor ao empreendimento e reduzindo os riscos de viabilidade (GUIMARÃES NETO et al., 2007; SILVA et al., 2014).

Diante dos aspectos técnicos abordados, pode-se observar que a escolha do forno não é algo simples de ser definido, devem-se levar em consideração muitos fatores, entre eles o custo para a construção, custo de manutenção, durabilidade do forno, rendimento gravimétrico, eficiência, a forma de controle do processo disponível, o nível de sustentabilidade do empreendimento e a matéria prima. No entanto, além desses aspectos não se pode deixar de considerar a importância do forno e sua influência nas propriedades físicas e químicas do carvão, nesse sentido a escolha deve ser sempre baseada em parâmetros e critérios técnicos (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

4.3 Processo de carbonização

O processo de pirólise da madeira é considerado um processo bastante complexo, sobretudo por ser constituída por diversas etapas que envolvem transformações físicas e químicas (DIAS JÚNIOR et al., 2018). No entanto esse processo é extremamente dependente da temperatura, pois esta influencia diretamente no rendimento dos produtos e subprodutos gerados. Neste sentido, o estudo do comportamento da pirólise de uma dada espécie em diferentes níveis de temperaturas é essencial (RIEGEL et al., 2008; SIEBENEICHLER et al., 2017).

A carbonização é um processo de pirólise lenta, que envolve a degradação térmica da madeira na ausência ou presença controlada de oxigênio, especialmente dos seus constituintes químicos (celulose, hemiceluloses e lignina). Consiste de uma reação irreversível de destilação que emite vapores e gases e promove a fixação do carbono (ASSIS et al., 2008; SANTOS; HATAKEYAMA, 2012). É um processo realizado em ambiente com as condições controladas de oxigênio, gerando produtos nos estados sólido (carvão, fuligem e cinzas), líquido (licor pirolenhoso) e gasoso (CO_2 , CO , CH_4 , H_2 e hidrocarbonetos de baixa massa molecular) (ARANTES et al., 2013).

A carbonização ocorre basicamente em quatro fases teóricas, são elas: Etapa I - fase de secagem com temperaturas que variam de 100 a 200°C, em que há o aquecimento da madeira com o objetivo de promover a retirada da água; Etapa II – ocorre a torrefação com temperatura entre 200 a 275°C, resultando na emissão dos materiais voláteis e degradação parcial da celulose, hemiceluloses e lignina; Etapa III - início do processo de carbonização, com temperatura variando de 275 a 400°C, ocorre à intensificação da decomposição da celulose e hemiceluloses e formação de gases e líquidos; Etapa IV – ocorre em temperaturas entre 400 e 500°C - fase em que o carbono é fixado e o processo de carbonização é finalizado (OLIVEIRA et al., 2013; PEREIRA et al., 2016; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019; WILK et al., 2016).

Diversos fatores relacionados a processo e matéria prima influenciam diretamente a produção de carvão vegetal, dentre eles o tipo de forno, temperatura final de carbonização, taxa de aquecimento, diâmetro do torete, umidade da madeira e densidade básica.

O diâmetro do torete é um importante fator que influencia a produção de carvão vegetal. A literatura demonstra que a carbonização de resíduos do manejo florestal sustentável com diâmetros distintos em fornos de alvenaria culmina em alta produção de tiços (LIMA, 2020). Figueroa e Moraes (2009) corroboram que as taxas de carbonização são fortemente influenciadas pelas dimensões das peças. Toretos de madeira de *Eucalyptus* sp. aos 7 anos de idade com diâmetros distintos (6 cm, 10 cm e 14 cm) apresentaram perfil térmico diferente em função do diâmetro (JESUS et al., 2019). Além disso, o estudo demonstrou que a transferência de calor no sentido superfície-centro das peças foi diferente nos três tratamentos diamétricos testados. Com base nisso, o controle da carbonização de resíduos do manejo florestal deve considerar o diâmetro das peças visando a homogeneização da produção de carvão vegetal.

A umidade é uma característica física da madeira que influencia negativamente o processo de carbonização. O uso de madeiras úmidas ($U_{bu} > 30\%$) promove aumento do ciclo de carbonização, conteúdo de gases não condensáveis elevado, taxa de aquecimento do forno reduzida, queda no rendimento gravimétrico em carvão vegetal e emissão de gases poluentes intensificada (ARRUDA et al.; 2011; CANAL et al., 2016).

Madeiras com densidade básica variando de média a alta ($> 0,5 \text{ g cm}^{-3}$) são mais adequadas para produção de carvão vegetal para siderurgia. O uso de madeiras com essa faixa de densidade aumenta a massa de madeira enforada (LIMA, 2020), reduz o consumo específico de lenha do processo e resulta em carvões mais densos (LIMA et al., 2020b).

Assim, o controle da matéria prima residual deve considerar a densidade básica como critério de separação de madeiras.

4.4 Potencial dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal

A carbonização na Amazônia é majoritariamente realizada com matéria prima residual oriunda do processamento mecânico de toras e de planos de manejo florestal sustentável (PMFS). Isso se dá por inúmeros motivos, como área reduzida de reflorestamentos na região, necessidade de abastecimento do polo siderúrgico de Carajás, disponibilidade de matéria prima residual e aporte legal para utilização dessa biomassa para fins energéticos, visando ao aproveitamento do que seria descartado e poderiam gerar transtornos ambientais (FREITAS et al., 2017; FORTALEZA et al., 2019; MOUTINHO et al., 2016; SILVA et al., 2007; SILVA et al., 2018; SILVA et al., 2019).

Os resíduos madeireiros oriundos da colheita de florestas nativas da Amazônia são promissores para a produção de carvão vegetal, em termos de qualidade, quantidade e disponibilidade. Além disso, o aproveitamento dos resíduos do manejo para produção de lenha e carvão é previsto na Instrução Normativa Nº 5, de 11 de dezembro de 2006, publicada pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2006). Estima-se que para cada 1 t de madeira colhida em planos de manejo certificados, são gerados até 2,14 t de resíduos madeireiros (NUMAZAWA et al., 2017). Em termos volumétricos, para cada 1 m³ de toras obtidos em PMFS são gerados 0,8 t de resíduos (EPE, 2018b). Em resumo, os galhos, restos de troncos e sapopemas são os principais resíduos gerados pelo manejo florestal na Amazônia (FRANCEZ et al., 2007).

Na prática, a utilização desses resíduos não segue critérios de classificação de tal forma que as propriedades físicas das madeiras utilizadas são bastante distintas. A variação das propriedades físicas e químicas das madeiras residuais estocadas em pátios de armazenamento de carvoarias na Amazônia, é justificada pelo número de espécies que são exploradas comercialmente sob regime de exploração de impacto reduzido em PMFS. Como consequência, a carbonização de matéria prima heterogênea afeta negativamente a eficiência de conversão, o rendimento gravimétrico e a qualidade do carvão vegetal produzido (LIMA et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2013; PELÁEZ-SAMANIEGO et al., 2008; SOARES et al., 2014; VITAL; PINTO, 2009). Diversos são os fatores que afetam a produção de carvão vegetal de madeira residual, são eles: espécie, dimensões da peça (diâmetro e comprimento), modelo de carbonização (tipo de forno) e o controle da temperatura (ASSIS et al., 2016).

A literatura demonstrou variações importantes para a densidade básica ($0,525 - 0,895 \text{ g cm}^{-3}$), densidade energética ($9,4 - 16,8 \text{ GJ m}^{-3}$), extrativos totais ($1,8 - 17,9\%$) e lignina total ($30,2 - 38,1\%$) (LIMA et al., 2020a) de madeiras residuais dos planos de manejo florestal. As variações mencionadas incluem resíduos com propriedades até superiores que madeiras de eucalipto, que é a principal matéria prima utilizada no Brasil para essa finalidade. Estudo conduzido por Gouvêa et al. (2015) demonstrou valores de lignina para madeiras de *Eucalyptus* sp. variando de 28,08 a 31,70%. Vale destacar que os carvões oriundos desses resíduos apresentam valores elevados de densidade relativa aparente ($0,423 - 0,620 \text{ g cm}^{-3}$), poder calorífico superior ($27,8 - 30,7 \text{ MJ kg}^{-1}$) e densidade energética ($12,3 - 18,4 \text{ GJ m}^{-3}$) (Lima et al., 2020b). Em resumo, carvões com alta resistência mecânica e elevada densidade energética que resulta em biorredutor com propriedades adequadas.

Muitos estudos foram realizados para demonstrar o potencial energético dos resíduos madeireiros produzidos na Amazônia e apresentar estratégias relevantes para a maximização energética dessa biomassa. Lima et al. (2021) propuseram a segregação de madeiras residuais do manejo florestal sustentável de 20 espécies nativas da Amazônia, baseado na colorimetria. Lima et al. (2020a) recomendaram a redução da heterogeneidade dos resíduos do manejo por meio da carbonização de grupos de espécies tropicais com propriedades tecnológicas da madeira similares. Fortaleza et al. (2019) analisaram as propriedades da madeira e do carvão vegetal proveniente de resíduos de serraria de três espécies florestais, no município de Paragominas, Estado do Pará. Silva et al. (2020) avaliaram os efeitos de espécie, temperatura e tempo de residência na temperatura final de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros no Estado do Pará. Estes estudos abordam temáticas fundamentais na criação de protocolos de produção, servindo de suporte aos produtores de carvão vegetal na região do Carajás.

Novos estudos devem abordar o processo de carbonização em campo, controlando a temperatura e o tempo de carbonização. Altas temperaturas apesar de contribuírem com o teor de carbono fixo, afeta negativamente o rendimento gravimétrico (TRUGILHO et al., 2001). Por outro lado, temperaturas baixas podem culminar em maior produção de atiços, que são madeiras não carbonizadas completamente (COSTA et al., 2019). A velocidade em que a pirólise é realizada, além do rendimento, influencia também as propriedades físico-químicas do carvão vegetal (SILVA et al., 2018).

Nessas circunstâncias, as pesquisas são importantes frente ao desenvolvimento de critérios técnicos ligados, sobretudo as propriedades químicas e físicas das madeiras destinadas à produção de carvão vegetal e as variáveis de processo, visando à otimização e

modernização dessa atividade. O controle da carbonização na maioria das carvoarias é realizado de maneira empírica com base na experiência do operador (coloração da fumaça e temperatura do forno, que é medida externamente pelo tato). Isso reflete em um carvão com propriedades variáveis, não atendendo as exigências dos consumidores domésticos e industriais (BRAND et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2019).

4.5 Propriedades do carvão vegetal destinado aos usos domésticos e industriais

Há muito tempo o homem utiliza a biomassa vegetal como combustível para a cocção de alimentos e iluminação (SOUZA et al., 2016). No Brasil, o carvão de origem vegetal possui uma ampla utilização, indo muito além das fronteiras da indústria siderúrgica, são comumente utilizados em churrascarias, indústrias cimenteiras, em usinas termelétricas, como carbono ativado de purificadores de água (DIAS JÚNIOR et al., 2015).

O carvão vegetal, quando produzido utilizando de pacote tecnológico adequado e considerando a qualidade da madeira, apresentará qualidade adequada. Não é possível assegurar uma alta eficiência de conversão e a qualidade do carvão, quando não se tem controle do processo e da matéria prima enforada (COSTA et al., 2019; SILVA et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019). Essa problemática está associada a grande parte das unidades de produção de carvão na Amazônia, e de maior frequência em carvoarias que atendem à demanda doméstica, o que pode ser explicado pela menor exigência do mercado consumidor quando comparado as indústrias siderúrgicas (ANATER et al., 2019; DIAS JÚNIOR et al., 2015).

A qualidade do carvão vegetal depende principalmente da espécie florestal (densidade básica e composição química) e do sistema de carbonização adotado (ARANTES et al., 2020; SOARES et al., 2014). A qualidade do carvão vegetal pode ser expressa pelas seguintes propriedades: poder calorífico, densidade aparente, umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo (ANATER et al., 2019).

O carvão com qualidade adequada para finalidade industrial deve apresentar densidade aparente elevada ($>0,250 \text{ g cm}^{-3}$), altos teores de carbono fixo ($\geq 75\%$), maior poder calorífico e baixos valores de umidade ($<5\%$, base seca), materiais voláteis (20 – 25%) e cinzas ($<5\%$) (ASSIS et al., 2016; COSTA et al., 2019; ROSA et al., 2012; SILVA; ATAÍDE, 2019). A exigência do carvão vegetal destinado ao uso siderúrgico é muito superior às exigências do consumo residencial, pois possuem finalidades distintas e necessitam de características específicas para ser utilizado como agente redutor de minério de ferro. De maneira geral,

pode-se afirmar que isso contribui com o maior controle da cadeia de produção que atendem essa finalidade (ANATER et al., 2019; COUTO et al., 2015).

Uma legislação adotada na região de Minas Gerais (Deliberação Normativa COPAM nº 227, de 29 de agosto de 2018) “estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal de floresta plantada e para avaliação da qualidade do ar no seu entorno e dá outras providências”. A legislação determina que a madeira a ser enforcada deve ter umidade abaixo de 40% (base seca) e estabelece rendimentos gravimétricos em carvão para pequenos (> 29%), médios (> 30%) e grandes (> 32%) produtores de carvão vegetal. As unidades de produção de carvão vegetal devem evitar vazamentos nos fornos, manter aberturas (tatus e baianas) limpas e desobstruídas e realizar estudo de dispersão de gases, com período dependendo do porte do empreendimento.

O Estado de São Paulo foi um dos pioneiros no Brasil a desenvolver uma certificação específica, contendo normas e padrões mínimos de qualidade do carvão vegetal produzido e comercializado no Estado para uso residencial. O carvão vegetal para receber o selo premium deve atender alguns requisitos, entre eles estão: não apresentar fragmentos de madeira semicarbonizada; conteúdo de carbono fixo igual ou superior a 73% (base seca); umidade inferior a 5% (base seca); conteúdo de cinzas abaixo de 1,5% (base seca); densidade relativa aparente acima de 0,2 g cm⁻³; geração de finos menor que 5% após embalado (SÃO PAULO, 2015). Além desses parâmetros, o carvão deve também apresentar teores de materiais voláteis menor que 25% (base seca) e poder calorífico acima de 7.500 kcal kg⁻¹ (ANDRADE, TOMAZELLO FILHO, MOUTINHO, 2018).

A criação deste selo implica no controle da qualidade do carvão, garantindo um produto com qualidade para o consumo doméstico (OLIVEIRA et al., 2019). Diante disso é imprescindível o controle da qualidade do carvão, pois informa ao consumidor a respeito do produto e permite a melhor utilização.

4.6 Estudo da combustibilidade e combustão espontânea do carvão vegetal

A análise térmica diz respeito a um grupo de técnicas nas quais se acompanham as variações em uma propriedade física do combustível e/ou de seus produtos de reação, sob um aumento controlado de temperatura (IONASHIRO; GIOLITO, 1980). Uma definição mais atual e compacta, dispõe que análises térmicas é o estudo da relação entre uma propriedade física do combustível e sua temperatura à medida que a amostra é aquecida ou resfriada de maneira controlada (DENARI; CAVALHEIRO, 2012). As análises térmicas são importantes

e recomendadas para entender as características fundamentais de pirólise do carvão vegetal, o que possibilitará prever o comportamento desse insumo em sistemas reais de combustão.

A análise termogravimétrica (TGA) pode ser definida como a técnica termoanalítica que acompanha a variação da massa da amostra, em função do tempo ou temperatura (DENARI; CAVALHEIRO, 2012). Essa análise pode fornecer informações importantes do carvão vegetal de resíduos do manejo florestal acerca da composição química, estabilidade térmica e das faixas de temperatura em que a decomposição é mais pronunciada (SOARES, 2011).

As medidas de variações de energia formam as bases técnicas da análise térmica diferencial (DTA – do inglês “differential thermal analysis”) e da calorimetria exploratória diferencial (DSC – do inglês “differential scanning calorimetry”) (SOARES, 2011). DTA diz respeito a técnica que determina continuamente a diferença entre as temperaturas da amostra e de um material de referência termicamente inerte, à medida que ambos são aquecidos em um reator. Já a DSC, é a técnica termoanalítica na qual as variações de entalpia da amostra são monitoradas em relação a um material de referência termicamente inerte enquanto ambas são submetidas a uma programação controlada de temperatura (DENARI; CAVALHEIRO, 2012). A DTA e DSC indica se a reação é exotérmica (libera calor) ou endotérmica (absorve calor), sendo o DSC capaz de descrever a quantidade de calor envolvido (SOARES, 2011). A diferença fundamental é que DSC é um método calorimétrico no qual são medidas diferenças de energia, enquanto DTA registra diferenças em temperatura (DENARI; CAVALHEIRO, 2012).

O estudo da combustibilidade por meio da análise termogravimétrica é uma alternativa importante para avaliar a performance do carvão vegetal de resíduos com potencial para combustão. Este método permite observar e entender os fenômenos térmicos de decomposição do biocombustível e seus constituintes moleculares em diferentes faixas de temperatura (FIALHO et al., 2019; GARCIA et al., 2016). Com a TGA, também é possível estabelecer parâmetros físicos relacionados ao processo de combustão (JANKOVIĆ et al., 2019; PROTÁSIO et al., 2019; SILVA et al., 2021). Os principais parâmetros analisados na combustão do carvão são: temperatura de ignição (T_i), temperatura de burnout (T_b), temperatura de máxima perda de massa ($T_{máx}$), taxa de combustão máxima $[(dm/dt)_{max}]$, taxa de combustão média $[(dm/dt)_{médio}]$, índice característico da combustão (S), índice de ignição (D_i) e o índice de inflamabilidade (C_i).

A temperatura em que a taxa de combustão aumenta $1\% \text{ min}^{-1}$, ou seja, a temperatura em que se inicia o maior processo de combustão é denominada de temperatura de ignição. Já a

temperatura final de combustão, definida como temperatura na qual a taxa de combustão diminui a 1%/min é conhecida na literatura como temperatura de burnout (MOON et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2017). O índice característico da combustão (S) reflete a reatividade durante todo o processo de combustão (GUO et al., 2020; QIAN et al., 2012; XIONG et al., 2014). Biocombustível com maior valor de S tem melhor desempenho na combustão pois queima mais vigorosamente (PROTÁSIO et al., 2020). O índice de ignição representa a performance durante a ignição e a reatividade do carvão, portanto, quanto maior for este índice melhor será o desempenho durante o processo de combustão do carvão vegetal (XIONG et al., 2014; PROTÁSIO, 2016). Em resumo, S, Ci e Di, indicam reatividade à combustão, inflamabilidade e facilidade de ignição, respectivamente (COSTA et al., 2020).

A literatura apresenta diversos estudos que avaliaram a combustibilidade de carvões minerais (coque), dentre eles o de Marinov et al. (2010), Idris et al. (2012), Shen et al. (2016) e Jankovic et al. (2019). Em contraste, poucos são os estudos térmicos com carvões vegetais reportados na literatura (PROTÁSIO et al., 2017; KLUSKA et al., 2020; MASSUQUE et al., 2021), demonstrando carência de pesquisas. Os carvões vegetais, insumo industrial produzido com matéria prima sustentável, apresentam potencial de substituição do coque, que é um combustível fóssil amplamente utilizado na indústria siderúrgica. Isso justifica a necessidade de ampliar os estudos de performance térmica de carvões vegetais de fontes renováveis.

Estudo realizado por Kluska et al. (2020) consta análise termogravimétrica de carvões de resíduos de espiga de milho produzidos em diferentes temperaturas (300 – 700°C) como critério para definir o carvão mais apropriado para finalidade doméstica. Nesse estudo, os autores reportaram que a temperatura de ignição e burnout do carvão aumentou, com uma diminuição simultânea no valor do índice S, juntamente com o aumento das temperaturas de carbonização. Assim, os carvões mais adequados para essa finalidade foram aqueles produzidos em temperaturas de carbonização acima de 500°C, pois atendem aos padrões para a produção de carvão para churrasco.

Protásio et al. (2017) avaliaram o perfil térmico de carvões de casca de babaçu produzidos em diferentes temperaturas finais de carbonização. Os autores descreveram que o aumento da temperatura final de carbonização aumentou a temperatura de ignição, a temperatura de burnout, o tempo de ignição e o tempo correspondente a taxa máxima de combustão. Os carvões produzidos em altas temperaturas apresentam maior dificuldade de combustão devido ao decréscimo na reatividade de combustão.

Massuque et al. (2021) demonstraram que carvões de espécies do bioma Miombo no norte de Moçambique, especialmente da espécie *Uapaca kirkiana*, apresentaram performance

promissora, com elevados índices de combustibilidade ($1,37 \times 10^4 \text{ \% min}^{-1}/^\circ\text{C}^2$) e ignição ($13,13 \times 10^3 \text{ \% min}^{-3}$). Vale destacar que esses índices são altamente influenciados pelos parâmetros utilizados nos ensaios termogravimétricos (taxa de aquecimento, fluxo de gás, temperatura inicial e final, equipamento, granulometria da amostra e umidade).

Além do estudo de combustibilidade, entender a combustão espontânea do carvão implica em definir estratégias relevantes para o transporte e armazenamento desse insumo (BATISTELLA et al., 2016). A combustão espontânea é um fenômeno químico que ocorre mediante a reação de materiais combustíveis com o oxigênio, ocasionando uma lenta geração de calor, pelo qual os materiais elevam suas temperaturas, através de reações exotérmicas internas, e atingem temperaturas maiores do que o ambiente (ANTT, 2004). O processo de autocombustão do carvão vegetal pode acontecer durante o período de carbonização, principalmente quando não há controle por parte do operador, após o fim do ciclo de carbonização, quando não é realizado o resfriamento de maneira adequada, e pelo mau manuseio do material, que é inserido ainda quente no caminhão (DIAS et al., 2002; ROHDE, 2005).

No Brasil, a Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT é a responsável por regulamentar o transporte de produtos perigosos devidamente classificados, embalados, marcados, rotulados e sinalizados conforme Resolução nº 420, de 12 de fevereiro de 2004 (ANTT, 2004). Essa Resolução classifica os produtos perigosos em 9 classes, sendo elas:

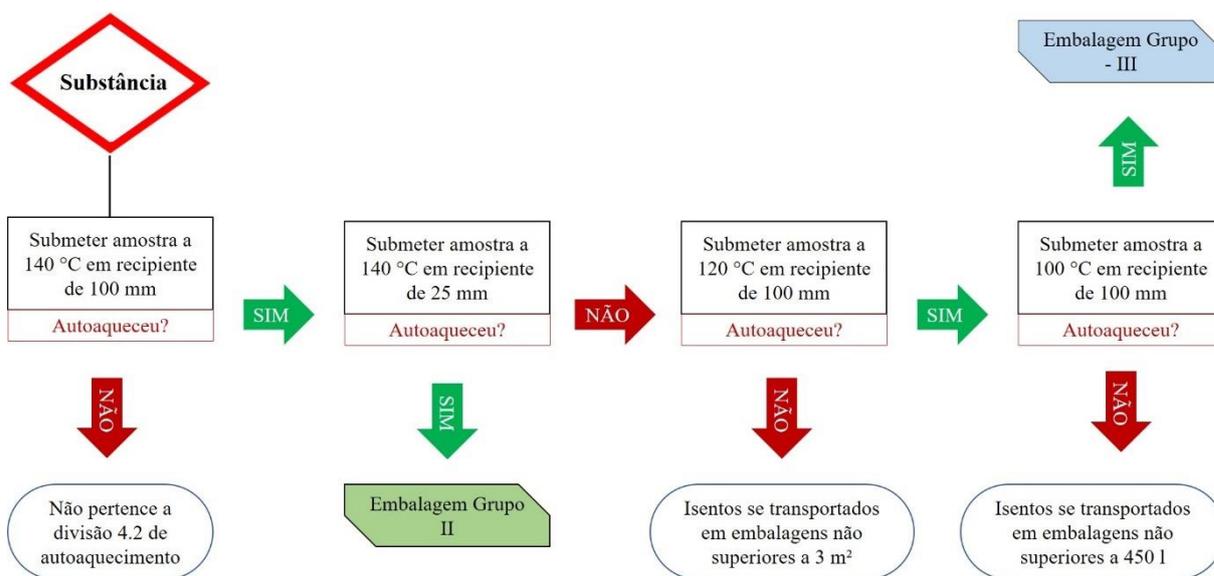
- Classe 1 – Explosivos;
- Classe 2 – Gases;
- Classe 3 – Líquidos inflamáveis;
- Classe 4 – Sólidos inflamáveis; substâncias sujeitas a combustão espontânea; substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis;
- Classe 5 – Substâncias oxidantes e peróxidos orgânicos;
- Classe 6 – Substâncias tóxicas e substâncias infectantes;
- Classe 7 – Materiais radioativos;
- Classe 8 – Substâncias corrosivas;
- Classe 9 – Substâncias e artigos perigosos diversos.

O carvão vegetal é considerado um produto sujeito à combustão espontânea, sendo enquadrado na classe 4 da Resolução da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2004). Nessa classe, os produtos podem ser classificados em 3 Subclasses (Subclasse 4.1 – sólidos inflamáveis; Subclasse 4.2 – Substâncias sujeitas à combustão espontânea; e

Subclasse 4.3 – Substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis). Especialmente o carvão vegetal, se enquadra na Subclasse 4.2, que engloba substâncias sujeitas a aquecimento espontâneo em condições normais de transporte, ou a aquecimento em contato com ar, podendo inflamar-se.

A ANTT determina que o transporte rodoviário do carvão vegetal seja realizado em transportadores devidamente identificados e sinalizados, conforme a ABNT NBR 7500 (2004). Entretanto, o material é dispensado desta legislação caso passe por um teste laboratorial que comprove que o combustível não está sujeito à combustão espontânea. Esse teste avalia amostras de carvão aquecidos a 140 °C por até 24 horas em estufa de circulação de ar forçado, sendo verificado posteriormente a ocorrência de autocombustão. Esse processo ocorre quando a taxa de produção de calor excede a taxa de perda e a temperatura de ignição é atingida. O tempo de exposição ao calor é o fator determinante para ocorrer a autocombustão (ONU, 2009). O teste de combustão espontânea e a classificação do carvão vegetal são baseados no manual de ensaios e critérios de recomendação sobre o transporte de mercadorias perigosas, que pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 - Manual de Ensaios e Critérios de Recomendação sobre o Transporte de Mercadorias Perigosas.



Fonte: JESUS (2020).

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7500:2003**: identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos. Rio de Janeiro, 2004.

- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Resolução ANTT N° 420/02/2004**. Disponível em: <<http://www.sbpc.org.br/upload/conteudo/320110405154556.pdf>>. Acesso em: 11 dez 2021.
- ANATER, M. J. N.; SANQUETTA, C. R.; BRAND, M. A.; SILVA, D. A.; DALLA CORTE, A. P. Análise da qualidade do carvão vegetal para uso residencial na região de Curitiba, Paraná, Brasil. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 123, p. 494-504, 2019.
- ANDRADE, F. W. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOUTINHO, V. H. P. Influence of Wood Physical Properties on Charcoal from *Eucalyptus* spp. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, p. e20150176, 2018.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; MOULIN, J. C.; GOULART, S. L.; BARAUNA, E. E. P.; ABREU NETO, R. Anatomy of charcoal and carbonization effect under *Eucalyptus* Fibers' dimensions. **Floresta e Ambiente**; v. 27, n. 1, p. e20170643, 2020.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R. Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, v. 19, n. 3, p. 423-431, 2013.
- ARRUDA, T. P. M.; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, v. 35, n. 4, p. 949-955, 2011.
- ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T. Sistema alternativo para carbonização de madeira. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 78, p. 133-140, 2008.
- 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, p. 519-536, 2016.
- BAILIS, R.; RUJANAVECH, C.; DWIVEDI, P.; VILELA, A. O.; CHANG, H.; MIRANDA, R. C. Innovation in charcoal production: a comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, n. 17, p. 189-200, 2013.
- BATISTELLA, L.; AVIZ, A.; NOGUEIRA, M. F. M.; PIRES, A. A.C.; ROUSSET, P. **Influência da umidade relativa no auto-aquecimento do carvão vegetal**. In: fórum nacional sobre carvão vegetal. Belo Horizonte, 2016, p. 1-5.
- BRAND, M. A.; RODRIGUES, A. A.; OLIVEIRA, A.; MACHADO, M. S.; ZEN, L. R. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na região serrana sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, 2015.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Instrução normativa MMA n° 5 de 11/12/2006**. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação

técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas, Brasil, 2006.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; PEREIRA, B. L. C.; DONATO, D. B. Efeito do teor de umidade da madeira na emissão de gases do efeito estufa no processo de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 112, p. 831-840, 2016.

CARDOSO, M. T.; DAMÁSIO, R. A. P.; CARNEIRO, A. C. O.; JACOVINE, L. A. G.; VITAL, B. R.; BARCELOS, D. C. Construção de um sistema de queima de gases da carbonização para redução da emissão de poluentes. **Cerne**, v.16, p.115-124, 2010.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIALHO, L. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; SILVA, C. M. S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, v. 46, n. 4, p. 473-480, 2016.

CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. *In*: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (orgs.). **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora, 2013.

CARVALHO, S. R.; BORGESI, V. L.; B. H. O.; OLIVEIRA, R. L. M.; FIGUEIRA JÚNIOR, E. A.; PESSOA FILHO, J. S. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. **Revista Árvore**, v. 36, n. 4, p. 787-796. 2012.

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade**. 173 p., 1982.

COSTA, A. C. P. R.; RAMALHO, F. M. G.; COSTA, L. R., TRUGILHO, P.F.; HEIN, P. R. G. Classification of commercial charcoal for domestic use by near infrared spectroscopy. **Biomass and Bioenergy**, n. 127, v. e105280, p. 1-7, 2019.

COSTA, J. S.; SILVA, M. G.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; ASSIS, M. R.; BUFALINO, L.; NUMAZAWA, S.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Relating features and combustion behavior of biomasses from the Amazonian agroforestry chain. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2020.

COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. P. Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817-831, 2015.

- DAMÁSIO, R. A. P., OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BARCELOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S. Perfil térmico e controle da carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 1, p. 11-22, 2015.
- DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, É. T. G. **Princípios e aplicações de análise térmica**. São Carlos: IQSC, 2012. 40 p.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, C. R.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; BRITO, J. O.; TRUGILHO, P. F. Pirólise e subprodutos da madeira de espécies do semiárido brasileiro. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 117, p. 65-75, 2018.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; BRITO, J. O.; ANDRADE, C. R. Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1127-1133, 2015.
- DIAS, E. C.; ASSUNÇÃO, A. A.; GUERRA, C. B.; PRAIS, H. A. C. Processo de trabalho e saúde dos trabalhadores na produção artesanal de carvão vegetal em Minas Gerais, Brasil. **Caderno de Saúde Pública**, v. 18, n. 1, p. 269-277, 2002.
- DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. L. M.; VITAL, B. R.; MILAGRES, E. G.; CANAL, W. D. Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 11, n. 2, p. 63-73, 2020.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Brazilian energy balance - year 2019**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2020.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica EPE 17/18: Potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2018a.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2018b.
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Forestry production and trade**, 2017.
- FIALHO, L. F.; CARNEIRO, A. C. O.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. P. S.; SURDI, P. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A.; PERES, L. C. Application of thermogravimetric analysis as a pre-selection tool for *Eucalyptus* spp. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. e6363, 2019.
- FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, G. R.; CARNEIRO, A. P. S.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, C. M. S.; CASTRO, V. R. Caracterização do carvão

- vegetal produzido em fornos retangulares industriais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. e5659, 2019.
- FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Wood behavior at high temperatures. **Ambiente Construído**, v. 9, p. 157–174, 2009.
- FORTALEZA, A. P.; NASCIMENTO FILHO, J. J. P.; CERETTA, R. P. S.; BARROS, D. S.; SILVA, S. S. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1436-1451, 2019.
- FRANCEZ, L. M. B.; CARVALHO, J. O. P.; JARDIM, F. C. S. Mudanças ocorridas na composição florística em decorrência da exploração florestal em uma área de floresta de Terra Firme na região de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 2, p. 219-228, 2007.
- FREITAS, F. P.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; GOUVÊA, A. F. G.; CARVALHO, A. G.; CASTRO, M. P. Decomposição térmica de resíduos lignocelulósicos visando seu aproveitamento para fins energéticos. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 1, p. 29-35, 2017.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Decomposição térmica de pellets de madeira por TGA. **HOLOS**, v.1, n. 32, p. 327-339, 2016.
- GOUVEA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; ASSIS, C. O.; ASSIS, M. R.; COLODETTE, J. L.; GOMES, C. G. Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 2, p. 71-78, 2015.
- GOMES, A. F.; MARTINS, M. A.; PEREIRA, E. G.; SANTOS, I. S.; CARNEIRO, A. C. O.; Qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 677-687, 2020.
- GUIMARÃES NETO, R. M.; PIMENTA, A. S.; SOARES, N. S.; VITAL, B. R.; SILVA, J. S. Avaliação econômica e financeira de projetos de fornos dos tipos container industrial e retangular de 40 estéreos. **Revista Árvore**, v. 31, n. 4, p. 709-715, 2007.
- GUO, F.; HE, Y.; HASSANPOUR, A.; GARDY, J.; ZHONG, Z. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal. **Energy**, v. 197, p. 117147, 2020.
- IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2020**: Ano base 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 22 out. 2020.

IDRIS, S. S.; RAHMAN, N. A.; ISMAIL, K. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). *Bioresource Technology*, v. 123, p. 581-591, 2012.

IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica. *Cerâmica*, v. 26, n. 121, p. 17-24, 1980.

JANKOVIĆ, B.; MANIĆB, N.; RADOVIĆC, I.; JANKOVIĆD, M.; RAJAČIĆD, M. Model-free and model-based kinetics of the combustion process of low rank coals with high ash contents using TGA-DTG-DTA-MS and FTIR techniques. *Thermochimica Acta*, v. 679, p. 178337, 2019.

JESUS, M. S. **LAPEM TALKS** - Mito da combustão espontânea do carvão vegetal. Youtube, 10 jul. 2020. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=Lt5YyppliTY&t=11s>>. Acesso em: 30 mar. 2022.

JESUS, M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; MARTINEZ, C. L. M.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. P. S.; ASSIS, M. R. Thermal decomposition fundamentals in large-diameter wooden logs during slow pyrolysis. *Wood Science and Technology*, v. 53, p. 1353–1372, 2019.

JUIZO, F.; GUMANE, C.; LIMA, M. R.; SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 12, n. 3, p. 386-390, 2017.

KLUSKA, J.; OCHNIO, M.; KARDAŚ, D. Carbonization of corncobs for the preparation of barbecue charcoal and combustion characteristics of corncob char. *Waste Management*, v. 105, p. 560-565, 2020.

LIMA, M. D. R. **A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na Amazônia Brasileira**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, 205p. 2020.

LIMA, M. D. R. PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JUNIOR, U. O.; SILVA, R. C. C.; BUFALINO, L.; NUMAZAWA, S.; HEIN, P. R. G.; PROTASIO, T. P. Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. *Renewable Energy*, v. 163, p. 792-806, 2021.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JÚNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy*, v. 140, p. 105660, 2020a.

- LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, n. 142, p. e105804, 2020b.
- MARINOV, S. P.; GONSALVES, L.; STEFANOVA, M.; YPERMAN, J.; CARLEER, R.; REGGERS, G.; YÜRÜM, Y.; GROUDEVA, V.; GADJANOV, P. Combustion behaviour of some biodesulphurized coals assessed by TGA/DTA. *Thermochimica Acta*, v. 497, n. 1–2, p. 46-51, 2010.
- MASSUQUE, J.; MATAVEL, C. E.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Combustion performance of charcoal: a comparative study on Miombo woodland native species and *Eucalyptus grandis*. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2021.
- MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 232–240, 2013.
- MOUTINHO, V. H. P.; ROCHA, J. J. M.; AMARAL, E. P.; SANTANA, L. G. M.; ÁGUIAR, O. J. R. Propriedades Químicas e Energéticas de Madeiras Amazônicas do Segundo Ciclo de Corte. **Floresta Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 443-449, 2016.
- NUMAZAWA, C. T. D.; NUMAZAWA, S.; PACCA, S.; JOHN, V. M. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 122, p. 280-285, 2017.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; RODRIGUEZ, A. V.; AMARAL, B. M. N.; PEREIRA, B. L. C. Resfriamento artificial em fornos retangulares para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 39, n. 4, p. 769-778, 2015.
- OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMÁSIO, R. A. P. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557-566. 2013.
- OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C.; SALLES, T. T.; CARNEIRO ACO, LANA, A. Q. Análise de risco econômico de dois sistemas produtivos de carvão vegetal. **Floresta Ambiente**, v. 24, p. e20160265, 2017.
- OLIVEIRA, A. C.; RAMOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O. Carbonization temperature and charcoal properties at different positions in rectangular kiln. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. e8493, 2020.

- OLIVEIRA, A. C.; SALLES, T. T.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BRAGA, C. S.; SANTOS, R. C. Viabilidade econômica da produção de carvão vegetal em dois sistemas produtivos. **Floresta**, v. 44, n. 1, p. 143 - 152, 2014.
- OLIVEIRA, R. S.; SILVA, L. F. F.; ANDRADE, F. W. C.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-10, 2019.
- ONU – Organização das Nações Unidas. **Recommendations on the transport of dangerous goods**: manual of tests and criteria. 5 ed. United Nations Publications: New York and Geneva, 2009.
- ONU - Organização das Nações Unidas/Brasil. **17 objetivos para transformar o mundo**, 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/>>. Acesso em: 5 abr. 2019.
- PELÁEZ-SAMANIEGO, M. R.; GARCIA-PEREZ, M.; CORTEZ, L. B.; ROSILLO-CALLE, F.; MESA, J. Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 12, n. 4, p. 1063-1086, 2008.
- PEREIRA, A. A.; LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; NUMAZAWA, S.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO, T. P. Grouping of wood residues from sustainable forest management aiming at bioenergy generation. **Scientia Forestalis**, v. 48, p. 1–14, 2020.
- PEREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O. Pyrolysis gases burners: sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 592-600, 2016.
- PINHEIRO, P. C. C. **A produção de carvão vegetal**: teoria e prática. Belo Horizonte: Edição do Autor, 2006.
- PROTÁSIO, T. P. **Características de crescimento, madeira e carvão para a classificação de clones de *Eucalyptus* spp. visando o uso energético**. 2016. 163 f. Tese (Doutorado em Ciência e tecnologia da madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- PROTÁSIO, T. P.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; ARAÚJO, A. C. C.; FIGUEIREDO, I. C. R.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Insights in quantitative indexes for better grouping and classification of *Eucalyptus* clones used in combustion and energy cogeneration processes in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 143, p. 105835, 2020.
- PROTÁSIO, T. D. P.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; SEYEDMOHAMMAD MIRMEHDI, S.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; KNOVACK, K. M. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 1-9, 2017.

- PROTÁSIO, T. P.; SCATOLINO, M.V.; ARAÚJO, A. C. C.; OLIVEIRA, A. F. C. F.; FIGUEIREDO, I. C. R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior *Eucalyptus* firewood. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 3, p. 626–641, 2019.
- QIAN, W.; XIE, Q.; HUANG, Y.; DANG, J. S. K.; YANG, Q.; WANG, J. Combustion characteristics of semicokes derived from pyrolysis of low rank bituminous coal. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 22, p. 645–650, 2012.
- RIEGEL, I.; MOURA, A. B. D.; MORISSO, F. D. P.; MELLO, F. S. Análise termogravimétrica da pirólise da acácia-negra (*Acacia mearnsii* de Wild.) cultivada no Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Árvore**, v. 32, n. 3, p. 533-543, 2008.
- RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143 p. 104670. 2019.
- 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, 2005, 27p
- ROSA, R. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; ANDRADE, W. S. DE P.; MOULIN, J. C. Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 3, n. 2, p. 41-48, 2012.
- SANTOS, S. F. O. M.; HATAKEYAMA, K. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. **Produção**, v. 22, n. 2, p. 309-321, 2012.
- SANTOS, S. F. O. M.; PIEKARSKI, C. M.; UGAYA, C. M. L.; DONATO, D. B.; BRAGHINI, A.; FRANCISCO, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L. Life cycle analysis of charcoal production in masonry kilns with and without carbonization process generated gas combustion. **Sustainability**, v. 9, n. 9, p. e1558, 2017.
- SÃO PAULO. Resolução SAA - 40, de 14 de dezembro 2015. Altera a Resolução SAA 10, de 11 de julho de 2003, que define Norma de Padrões Mínimos de Qualidade para Carvão Vegetal [...]. **Diário oficial do Estado de São Paulo**: v. 125, n. 232 - São Paulo, 15 de dezembro de 2015.
- SHEN, G.-D.; WANG, Z.-Q.; WU, J.-L.; HE, T.; LI, J.-Q.; YANG, J.; WU, J.-H. Combustion characteristics of low-rank coal chars in O₂/CO₂, O₂/N₂ and O₂/Ar by TGA. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, v. 44, n. 9, p. 1066-1073, 2016.

- SCHURE, J.; HUBERTM, D.; DUCENNE, H.; KIRIMI, M.; AWONO, A.; MPURUTA-KA-TITO, R.; MUMBERE, G.; NJENGA, M. 2021. **Carbonization 2.0**: how to produce more charcoal with less wood and emissions. Brief 1. Sustainable woodfuel brief series. Governing Multifunctional Landscapes Project. Bogor, Indonesia and Nairobi, Kenya: CIFOR-ICRAF, 2021.
- SIEBENEICHLER, E. A.; COSTA, L. M., FIGUEREDO, N. A.; TRONTO, J.; ROCHA, P. A. Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Ciência da Madeira**, v. 8, n. 2, p. 82-94, 2017.
- SILVA, A. C.; ARANTES, M. D. C.; GONÇALVES, F. G.; ALMEIDA, M. N. F; SANTOS, L. M. H.; ANDRADE, J. K. B.; MININI, D. Qualidade do carvão vegetal produzido com resíduos de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 123, p. 536-544, 2019.
- SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: product yields and characterization. **Energy**, v. 172, 509–516, 2019.
- SILVA, D. A. L.; CARDOSO, E. A. C.; VARANDA, L. D.; CHRISTOFORO, A. L.; MALINOVSKI, R. A. análise de viabilidade econômica de três sistemas produtivos de carvão vegetal por diferentes métodos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 185-193, 2014.
- SILVA, L. F. F.; CASTRO, A. R. S.; OLIVEIRA, R. S.; SILVA, S.S. PAMPLONA, V. M. S.; BARROS, D. S., NOBRE, J. R. C.; NUMAZAWA, S. Seleção de espécie, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, p. e201801737, p. 1-11, 2020.
- SILVA, L. L. H.; CALEGARI, E. O. L.; PIMENTA, M. A. C.; PIMENTA, A. S.; DANTAS, M. K. L. Características energéticas do carvão vegetal de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) e leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) R. de Wit). **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 412-419, 2018.
- SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007.
- SILVA, M. O. S.; SILVA, M. G.; BUFALINO, L.; ASSIS, M. R.; GONÇALVES, D. A.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Características termogravimétricas e combustão da madeira de *Tachigali vulgaris* proveniente de plantios com diferentes espaçamentos. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, p. e3164, 2021.
- SILVA, R. T.; SETTE JÚNIOR, C. R.; FRANCO, M. P.; TOMAZELLO FILHO, M.; LACLAU, J. P.; CHAIX, G. Disponibilidade hídrica e fertilização mineral nas características

da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1168-1179, 2019.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras. Lavras, 108p. 2011.

SOARES, V. S.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

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 Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 270-277, 2016.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). **Scientia Agrária**, v. 2, n. 1-2, p. 45-53, 2001.

UDDIN, M. N.; TAWEEKUN, J.; TECHATO, K.; RAHMAN, M. A.; MOFIJUR, M.; RASUL, M. G. Sustainable biomass as an alternative energy source: Bangladesh perspective. **Energy Procedia**, v. 160, p. 648–654, 2019.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Bioenergia**, v. 14, p. 67–85, 2008.

VITAL, M. H. F.; PINTO, M. A. C. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. **BNDES Setorial**, v. 30, p. 237-297, 2009.

WILK, M.; MAGDZIARZ, A; KALEMBA, I.; GARA, P. Carbonisation of wood residue into charcoal during low temperature process. **Renewable Energy**, n. 85, p. 507-513, 2016.

XIONG, S.; ZHANG, S.; WU, Q.; GUO, X.; DONG, A.; CHEN, C. Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 86-92. 2014.

5 CAPÍTULO 1 – QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO POR MEIO DA SEGREGAÇÃO DOS RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA ORIENTAL VISANDO AO USO SIDERÚRGICO

Resumo

Esse estudo teve como objetivo principal analisar como a segregação dos resíduos influencia a qualidade do carvão vegetal visando à utilização siderúrgica. Quatro grupos de madeiras com propriedades similares segregadas com base na análise de componentes principais foram adotados. Além desses grupos, foi considerado um quinto grupo, como sendo a forma tradicional de carbonização na região. A qualidade do carvão foi determinada baseada nas propriedades físicas (densidade relativa aparente e umidade), mecânicas (friabilidade), química (conteúdos de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas) e energéticas (poder calorífico superior e densidade energética). O estudo revelou que a segregação de madeiras residuais culminou na elevação da qualidade do carvão vegetal produzido nos fornos de alvenaria. O grupo 1, formado por carvões de resíduos da espécie *Dinizia excelsa*, apresentou os melhores valores de densidade ($0,737 \text{ g cm}^{-3}$), teor de cinzas (1,20%), poder calorífico ($28,9 \text{ MJ kg}^{-1}$) e densidade energética ($21,3 \text{ MJ m}^{-3}$). Em contraste, o grupo 5 (carbonização tradicional) se mostrou muito variável, com carvões mais friáveis. A segregação dos resíduos influenciou positivamente na densidade relativa aparente, friabilidade, teor de cinzas, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e densidade energética. Esses resultados são importantes, pois a indústria siderúrgica requer carvão vegetal de alta qualidade e de origem legalizada para os processos relacionados à redução do minério de ferro.

Palavras-chave: biomassa residual, carbonização, friabilidade, fornos de alvenaria e indústria siderúrgica.

5.1 Introdução

O carvão vegetal há décadas vem se destacando entre as principais fontes energéticas renováveis, especialmente por ser um combustível limpo, que emite baixas concentrações de gases poluentes para a atmosfera. No Brasil, o carvão é substancialmente utilizado pelas indústrias siderúrgicas nos altos-fornos como fonte de calor e como agente termorredutor do minério de ferro, bem como para na cocção de alimentos e aquecimento (PEREIRA et al., 2016; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

O Brasil ocupa posição de destaque na produção mundial de carvão vegetal, em 2019 foram produzidos aproximadamente 5,3 milhões de toneladas ou 12% da produção mundial (IBGE, 2020). Esse resultado está relacionado as florestas energéticas, que contribuem com cerca de 95% de todo o carvão produzido nacionalmente. As espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais utilizadas, pois apresentam rápido crescimento e elevada produtividade (IBGE, 2020; IBÁ, 2020), propriedades físicas e químicas adequadas para a produção de carvão vegetal, como alto conteúdo de extrativos totais (3 – 5% base seca) e lignina (> 30% base seca) (BRITO, 1993; OLIVEIRA et al., 2010).

Na região Norte do Brasil, os reflorestamentos com espécies de *Eucalyptus* são incipientes, para atender a demanda do setor siderúrgico, devido a fatores bioedafoclimáticos como alto índice pluviométrico, solos altamente salinos, baixa fertilidade e clones pouco adaptados a essas condições (ARAÚJO et al., 2018; COSTA et al., 2014). O relatório IBÁ (2020) apontou a área total de 154.402 hectares de florestas de *Eucalyptus* no estado do Pará no ano de 2019, demonstrando a insuficiência de matéria prima para abastecer o setor energético da região do Carajás, que detém o segundo maior polo siderúrgico do Brasil (UHLIG et al., 2008). Diante disso, fontes alternativas sustentáveis de biomassa lenhosa com propriedades adequadas para produção de carvão vegetal são necessárias.

A literatura tem apresentado os resíduos do manejo florestal sustentável (restos de troncos, sapopemas e galhos) (LIMA et al., 2020a; LIMA et al., 2020b; PEREIRA et al., 2020; LIMA et al., 2021) e resíduos do processamento mecânico de toras (SILVA et al., 2007; FORTALEZA et al., 2019; MORAIS et al., 2021) como fontes importantes e estratégicas para produção de carvão vegetal na Amazônia.

O aproveitamento dos resíduos do manejo para produção de lenha e carvão é previsto na Instrução Normativa Nº 5, de 11 de dezembro de 2006, publicada pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2006). Contudo, esses resíduos e os carvões produzidos são muito heterogêneos por serem oriundos de diversas espécies com constituições químicas distintas (SILVA et al., 2020a). Além disso, a produção de carvão com resíduos na Amazônia é majoritariamente realizada em fornos de alvenaria de baixa tecnologia, comumente conhecidos como “fornos do tipo rabo quente”. A produção de carvão com matéria prima heterogênea nesses fornos tem resultado em baixos rendimentos gravimétricos (< 25%), consequentemente, em baixa eficiência de conversão (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

Estudo conduzido por Lima et al. (2020a) demonstrou que as madeiras residuais do manejo florestal sustentável apresentam propriedades promissoras para produção de carvão

vegetal, como densidade básica (0,525–0,895 g cm⁻³), densidade energética (9,4–16,8 GJ m⁻³), extrativos totais (1,8–17,9%), lignina total (30,2–38,1%) e poder calorífico superior (19,1–20,9 MJ kg⁻¹). Contudo, os carvões vegetais dessas madeiras apresentam densidade aparente (0,423–0,620 g cm⁻³), poder calorífico superior (27,8–30,7 MJ kg⁻¹), densidade energética (12,3–18,4 GJ m⁻³), teor de carbono fixo (67,2%–75,3%), e teor de cinzas (0,5–9,6%) muito variáveis (LIMA et al., 2020b). É importante destacar que os limites superiores dessas variações são mais elevados do que os valores médios dessas propriedades para carvões comerciais de espécies do gênero *Eucalyptus*.

Uma possível solução para redução da heterogeneidade do carvão vegetal é realizar a segregação antes da carbonização de grupos com propriedades da madeira similares. A adoção dessa técnica pode melhorar os índices de produtividade e a qualidade do carvão na Amazônia, com reflexos positivos na indústria. Melhor homogeneidade das propriedades do carvão influencia positivamente na produção e qualidade do ferro gusa nas siderúrgicas (ASSIS et al., 2012). Assim, recomenda-se carvões com alta densidade, resistência mecânica e carbono fixo, bem como baixa umidade, reatividade e teores de cinzas e materiais voláteis (BRITO, 1993).

O uso de carvões mais densos e com maior teor de carbono fixo implica em maiores tempos de residência da carga metálica no interior da zona de reserva térmica do alto-forno (PICANCIO et al., 2018). Carvões mais úmidos promovem redução na temperatura interna do alto-forno, resultando em maior consumo específico de carvão vegetal (BRITO, 1993). Na siderurgia, os materiais voláteis reduzem a eficiência do carvão no alto-forno, em que maior concentração de matéria volátil significa menores níveis de carbono fixo (SANTOS, 2008). As cinzas afetam negativamente as propriedades mecânicas do ferro gusa, promovem corrosão dos equipamentos de queima e diminuem o poder calorífico do combustível (PEREIRA et al., 2013; PROTASIO et al., 2014). Carvões menos reativos promovem menor consumo de matéria prima nos reatores (BRITO, 1993). Assim, carvões com qualidade adequada e com menores variações são desejáveis para a indústria siderúrgica. Estima-se que o uso de carvão mais homogêneo e de qualidade estável promove redução mínima de 5% na relação tonelada de carvão por tonelada de ferro-gusa (CGEE, 2015).

A questão científica que norteou esse estudo foi: Como a segregação da madeira pode influenciar na qualidade dos carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria? Entende-se que a segregação pode melhorar as propriedades físicas e químicas dos carvões vegetais devido a utilização de matéria prima mais similar. Os principais objetivos analisados foram: (i) comparar as propriedades dos carvões vegetais produzidos com madeiras residuais

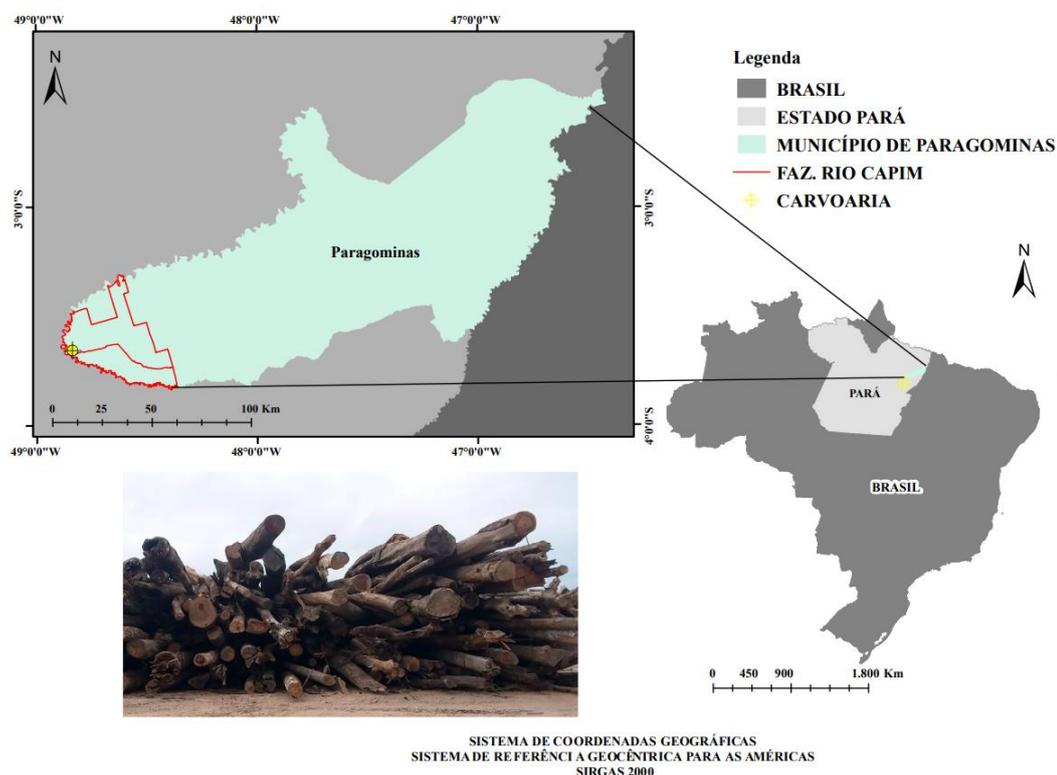
segregadas e não segregadas; e (ii) estudar as variações da qualidade desses combustíveis sólidos entre grupos de resíduos, entre fornos de alvenaria e dentro do mesmo grupo.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Origem do material biológico

As madeiras residuais utilizadas na produção do carvão vegetal, são oriundas do pátio de estocagem de resíduos da Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim (UPC Rio Capim) ($3^{\circ}39'13,40''$ S e $48^{\circ}50'16,90''$ O), localizada no município de Paragominas, Estado do Pará (Figura 8). Nesse estudo foram utilizados resíduos oriundos da galhada de 23 espécies florestais provenientes do manejo florestal sustentável praticado pelo Grupo Keilla.

Figura 8 – Localização da unidade de produção de carvão vegetal da Fazenda Rio Capim, localizada na cidade de Paragominas, Estado do Pará.



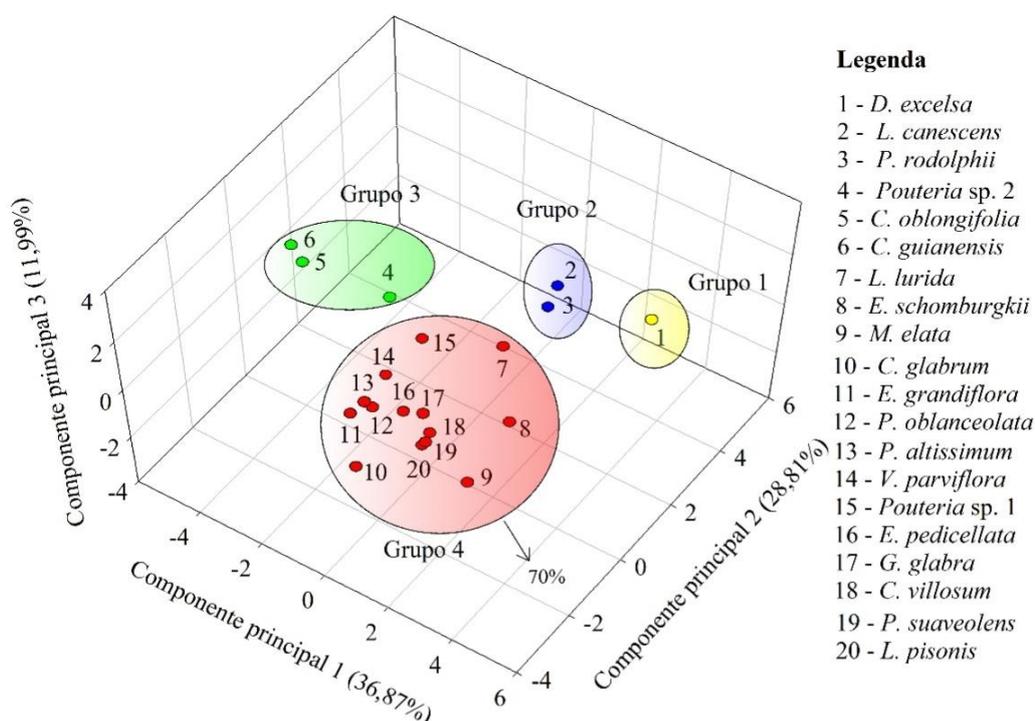
Fonte: Do autor.

5.2.2 Segregação dos resíduos madeireiros para produção de carvão vegetal

A segregação das madeiras residuais do manejo florestal sustentável baseou-se em pesquisas prévias, realizada por Lima et al. (2020a), que avaliaram a qualidade da madeira dos resíduos madeireiros de 20 espécies comerciais manejadas na mesma área do presente estudo. Assim, foram adotados 4 grupos de madeiras com propriedades similares segregadas

com base em uma técnica estatística multivariada, denominada de Análise de Componentes Principais (Figura 9). Essa análise estatística considerou as propriedades físicas (densidade básica, umidade e máximo teor de umidade), químicas (imediata: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas; e molecular: extrativos totais, lignina solúvel, lignina insolúvel e lignina total), energéticas (poder calorífico superior e densidade energética) e o consumo específico de lenha na produção de carvão vegetal. Maior detalhamento das propriedades utilizadas no agrupamento é apresentado em Lima et al. (2020a, 2020b).

Figura 9 - Grupos de espécies definidos pela análise de componentes principais visando à carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.



Fonte: Lima (2020).

Os grupos apresentados pela análise de componentes principais foram considerados na carbonização e realizada na Unidade de Produção de Carvão Rio Capim. Na prática, as espécies foram previamente identificadas e sinalizadas nas pilhas de madeira com fitas por um identificador botânico e separadas por grupos em novas pilhas por uma carregadeira (Volvo L90 F). As espécies *E. schomburgkii*, *C. guianensis*, *E. grandiflora*, *E. pedicellata*, *V. parviflora* e *P. oblanceolata* não foram encontradas, o que culminou na inclusão das espécies *Vatairea sericea*, *Eschweilera coriácea* e *Vantanea guianensis*, que são similares quanto as propriedades tecnológicas da madeira. Além dessas, foram incluídas as espécies *S. amara*, *P. gigantocarpa*, *Ocotea* sp.1, *Ocotea* sp.2 e *Protium* sp. com o objetivo de utilizar madeiras de

baixa densidade básica para simular a forma tradicional de carbonização da empresa. Todas as espécies utilizadas nesse estudo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Espécies amostradas para carbonização nos fornos de alvenaria da Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

N	Família	Nome científico	Nome comum	DB (g cm ⁻³)*
1	Anacardiaceae	<i>Anacardium giganteum</i> W.Hancock ex Engl.	Cajuaçu	0,486
2	Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	Breu-barrote	0,734
3		<i>Protium</i> sp.	Breu-amesclim	0,392
4	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiarana	0,667
5		<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá	0,639
6	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	Casca-Seca	0,841
7		<i>Parinari rodolphii</i> Huber	Coco-pau	0,830
8	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba	0,760
9	Humiriaceae	<i>Vantanea guianensis</i> Aubl.	Uxirana	0,843
10	Lauraceae	<i>Ocotea</i> sp. 1	Louro-amarelo	0,452
11		<i>Ocotea</i> sp. 2	Louro-preto	0,470
12	Lecythidaceae	<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	Tauari-branco	0,537
13		<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	Matamatá-branco	0,785
14		<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia	0,864
15		<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	Jarana	0,775
16	Leguminosae -Mimosoideae	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho	0,993
17		<i>Parkia gigantocarpa</i> Ducke	Fava-atanã	0,436
18		<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Timborana	0,631
19		<i>Vatairea sericea</i> (Ducke) Ducke	Angelim-amargoso	0,686
20	Sapotaceae	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba	0,911
21		<i>Pouteria</i> sp. 1	Abiorana	0,755
22		<i>Pouteria</i> sp. 2	Guajará-bolacha	0,667
23	Simaroubaceae	<i>Simarouba amara</i> Aubl.	Marupá	0,367

DB = densidade básica da madeira; *Fonte: Lima (2020).

Posteriormente, os resíduos foram seccionados por uma escavadeira florestal (CAT 320D FM Sotreq) com garra traçadora acoplada para obtenção de toretes com menores dimensões. Durante a etapa de seccionamento, foi realizada a amostragem das madeiras visando à retirada de corpos de prova com dimensões de 4 cm x 4 cm x 4 cm para a determinação da densidade básica da madeira identificação botânica na Xiloteca do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, localizada em Belém, Pará. Finalmente, os toretes foram levados para a frente dos fornos com uma caçamba basculante (Iveco, modelo Tector 260E28).

5.2.3 Cubagem rigorosa e densidade básica ponderada dos resíduos

O cálculo da densidade básica ponderada dos resíduos por forno leva em consideração o volume de madeira enfiada e os valores densidade básica da madeira de cada espécie. Cada peça de resíduo enfiado na carvoaria foi cubada pelo método de Smalian (Equação 1) visando a determinação do volume real de madeira enfiada em cada forno.

$$V = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{DE1^2 + DE2^2}{2} \right) \times L \quad (1)$$

Em que, V: Volume do torete (m³); DE1 e DE2: Diâmetros das extremidades 1 e 2 do torete (m²); e L: Comprimento do torete (m).

A densidade básica das madeiras residuais foi determinada seguindo as diretrizes da ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003). Doze corpos de prova por espécie com dimensões de 4 x 4 x 4 cm foram utilizados nessa análise. A densidade básica ponderada das madeiras por forno foi calculada por meio da Equação 2.

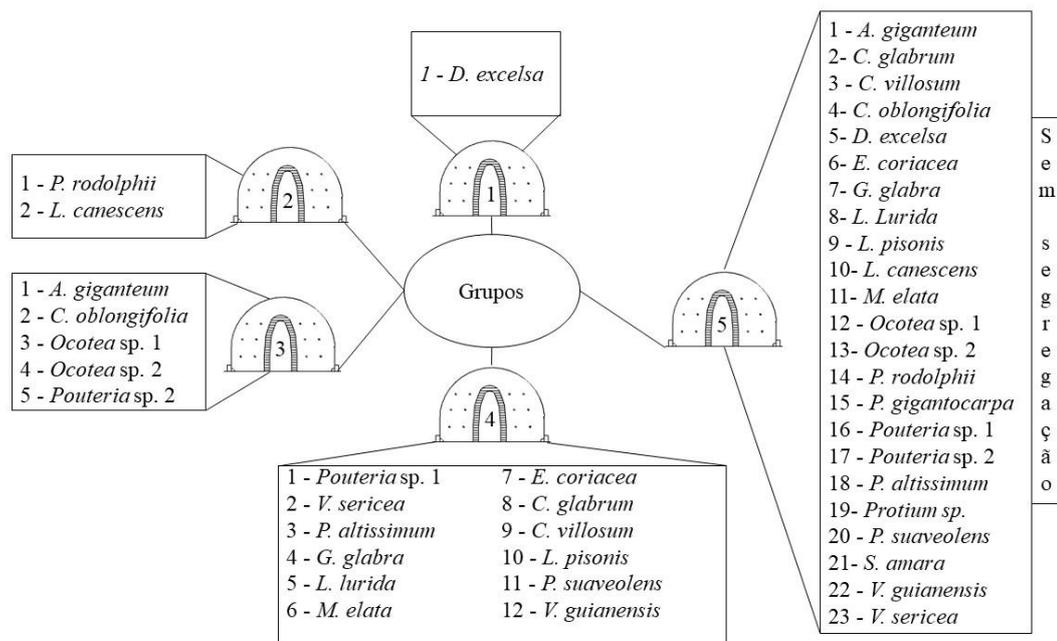
$$DBp = \frac{V_{E1} DB_{E1} + V_{E2} DB_{E2} + \dots + V_{En} DB_{En}}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (2)$$

Em que, DBp: Densidade básica ponderada de madeira do forno (ton m⁻³); VE1: Volume da espécie 1 no forno (%); DB_{E1}: Densidade básica da espécie 1 (ton m⁻³); $\sum_{i=1}^n V_i$: volume de madeira enfiada (m³).

5.2.4 Esquema da carbonização em fornos de alvenaria

Além dos quatro grupos de madeiras formado pela análise estatística, foi considerado um quinto grupo, como sendo a forma tradicional de carbonização empregada pela empresa. Esse grupo foi composto por todas as espécies conjuntamente (Figura 10). Foram utilizados 4 fornos de alvenaria por grupo de madeira, totalizando 20 fornos. Ciclo de carbonização de 12 dias foi utilizado, pois é o mesmo adotado pela empresa. Com relação as dimensões, os fornos foram padronizados com diâmetro da base de 3,20 m e altura de 2,5 m. Além disso, os fornos apresentavam em média 6 baianas na parte superior e 6 tatus na base do forno e uma chaminé com altura de 70 cm para emissão dos gases.

Figura 10 - Grupos de espécies segregados para a carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.

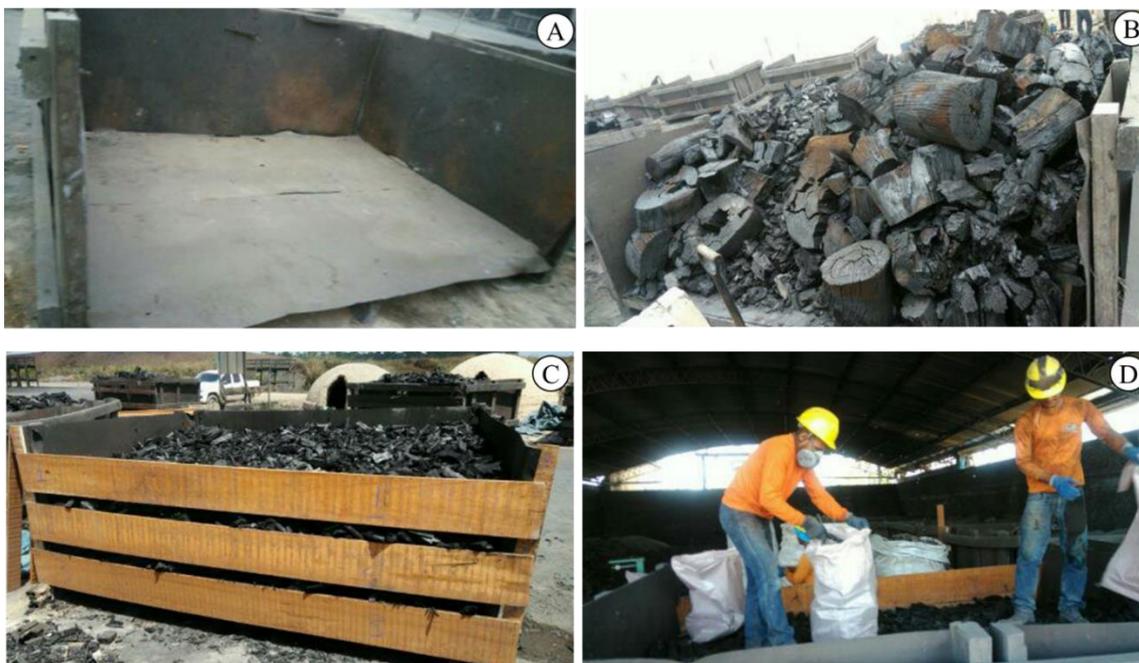


Fonte: Lima (2020).

5.2.5 Amostragem dos carvões vegetais produzidos nos fornos de alvenaria

Após as carbonizações, os carvões foram retirados dos fornos em caixas metálicas abertas na região frontal, com capacidade volumétrica de 9,7 m³ (Figura 11A e 11B). As caixas após serem cheias com carvão, tiveram a região frontal fechada com tábuas para que o insumo não caísse durante o trajeto ao galpão (Figura 11C), local onde o material foi amostrado. A amostragem do carvão vegetal foi realizada nessas caixas, sendo retirado 5 sacos de rafia de forma aleatória por caixa metálica (Figura 11D), totalizando 100 sacos, com aproximadamente 20 kg de carvão vegetal.

Figura 11 - Metodologia de amostragem do carvão – Caixa metálica vazia adotada na amostragem (A); Caixa metálica com todo o carvão vegetal produzido em um forno (B); Tábuas apregoadas na região frontal da caixa (C); e Amostragem do carvão na caixa metálica de forma aleatória.



Fonte: Do autor.

5.2.6 Qualidade do carvão vegetal

As propriedades físicas (densidade relativa aparente e umidade), mecânica (friabilidade), química (imediate – carbono fixo, materiais voláteis e cinzas) e energéticas (poder calorífico e densidade energética) foram as propriedades do carvão vegetal dos grupos de espécies analisadas nesse estudo.

Para a determinação das propriedades do carvão vegetal, foi realizada uma amostragem por quarteamento para definição das amostras/peças de carvão vegetal. A densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal foi determinada conforme a norma NBR 11941 adaptada (ABNT, 2003), em que o volume foi determinado pelo método hidrostático. A determinação da densidade relativa aparente foi realizada com 5 corpos de prova por saco de rafia, com dimensões variáveis.

A friabilidade é uma propriedade mecânica que mensura a capacidade do carvão resistir à formação de partículas e pó, devido ao seu manuseio, carregamento, descarregamento e transporte. Esta propriedade foi determinada pelo teste de tamboramento, seguindo as diretrizes da Norma MB 1375/80. Para tal, foram utilizadas amostras aleatórias em duplicata, totalizando 200 repetições. Foram utilizados aproximadamente 500 g de carvão de forma que passassem em uma peneira com malha 10 x 10 cm e retidos na peneira de 2 x 2

cm. Esta massa correspondeu a massa inicial do carvão (M_i). Posteriormente, cada amostra foi submetida a esforços de choque e atritos a 30 rpm, em um tambor rotatório elétrico, por 15 minutos.

Ao final do teste, todo carvão que ficou retido na peneira com malha de 2 x 2 cm, foi pesada a massa final (M_f) e, então, a friabilidade foi calculada por meio da Equação 3.

$$F = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (3)$$

Em que: Fri - Friabilidade do carvão vegetal (%), M_i – Massa inicial do carvão (g); e M_f - Massa final do carvão (g);

Os carvões vegetais serão classificados quanto a friabilidade levando em consideração a metodologia sugerida pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), citada por Oliveira et al. (1982) (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificação da friabilidade do carvão vegetal, segundo CETEC – MG.

Classificação	Friabilidade (%)
Muito friável	≥ 30
Bastante friável	25 – 29
Friabilidade média	15 – 24
Pouco friável	10 – 15
Muito pouco friável	< 10

A composição química imediata do carvão vegetal foi determinada a partir das amostras de carvão vegetal moídas e peneiradas, retidas em peneira de 60 *mesh* e, posteriormente, secas em estufa a 103 ± 2 °C, até massa constante, conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981). A determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo será realizada com base na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013).

O poder calorífico superior (PCS) dos carvões foi estimado por meio da Equação 4, ajustada ($R^2 = 0,93$) por Cordero et al. (2001). A densidade energética do carvão foi calculada levando em consideração o PCS e a DRA dos carvões dos grupos (Equação 5).

$$PCS = (0,3543 \times CF) + (0,1708 \times MV) \quad (4)$$

$$DE = PCS \times DRA \quad (5)$$

Onde, PCS: poder calorífico superior ($MJ m^{-3}$); TCF: teor de carbono fixo (%); TMV: teor de materiais voláteis (%), DE: densidade energética ($MJ m^{-3}$); e DRA: densidade relativa aparente ($kg m^{-3}$).

5.2.7 Análises estatísticas

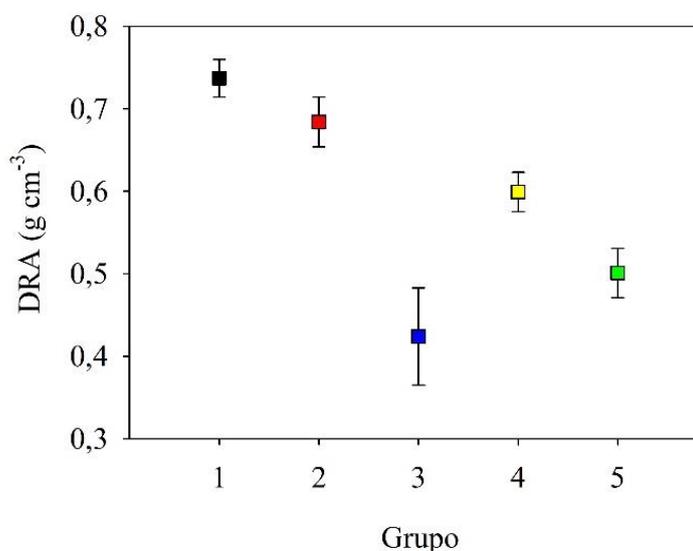
As análises estatísticas consistiram em análise de variância (ANAVA) e teste de comparação múltipla de médias. Antes da ANAVA, os pressupostos de normalidade de resíduos, homocedasticidade de variâncias e autocorrelação de resíduos foram analisados por meio do teste de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$), Bartlett ($p \leq 0,05$) e Durbin-Watson ($p \leq 0,05$), respectivamente. Para as comparações múltiplas das médias, o teste de Scott-Knott foi executado a um nível de significância de 5%. Com objetivo de avaliar a variação das propriedades do carvão por forno de alvenaria, foram produzidos boxplots. Análise de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) foi utilizada para verificar a associação entre a densidade básica ponderada da madeira e densidade relativa aparente por forno de alvenaria. Modelo polinomial de natureza quadrática foi ajustado para verificar o grau de associação entre as duas propriedades mencionadas. Além disso, a relação entre a densidade relativa aparente do carvão e poder calorífico superior com a densidade energética do carvão vegetal. Todas as análises foram realizadas em linguagem R, versão 3.6.2 (R CORE TEAM, 2021).

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Efeito da segregação na densidade relativa aparente do carvão vegetal

A segregação das madeiras residuais do manejo florestal sustentável influenciou positivamente a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Nota-se efeito significativo de grupo pelo teste de Scott-Knott (Figura 12). O grupo 1, formado pela espécie *D. excelsa*, apresentou carvão vegetal com maior valor médio de DRA ($0,737 \text{ g cm}^{-3}$). Por outro lado, o grupo 3 apresentou o menor valor de DRA ($0,424 \text{ g cm}^{-3}$), seguido do grupo 5 ($0,501 \text{ g cm}^{-3}$), formado por todas as espécies misturadas (modelo convencional de produção de carvão vegetal).

Figura 12 – Densidade relativa aparente (DRA) dos carvões vegetais de madeiras residuais por grupo de espécies. Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.

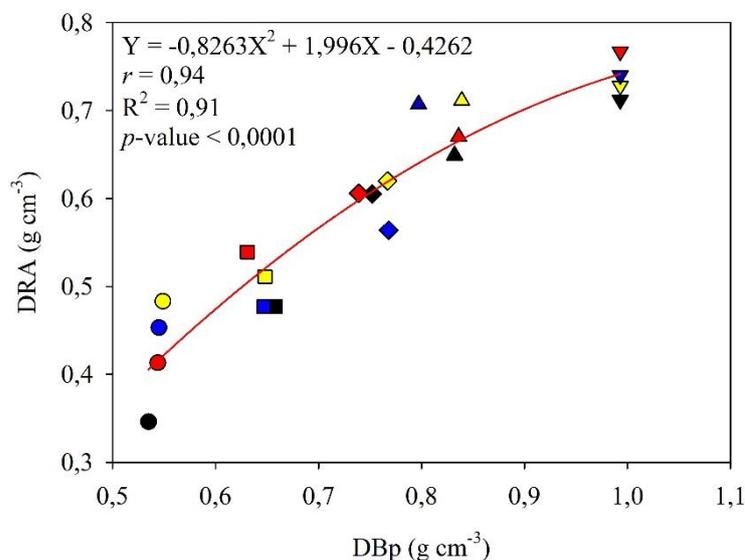


Todos os carvões, inclusive pertencentes ao grupo 5, apresentam valores médios de DRA adequados para utilização siderúrgica, pois carvões com DRA acima de $0,250 \text{ g cm}^{-3}$ são indicados para essa finalidade (ASSIS et al., 2016). Quanto ao potencial de uso siderúrgico, destacam-se em ordem os grupos 1, 2, 4, 5 e 3. Silva et al. (2020b) avaliaram a qualidade de carvões domésticos de duas marcas (A e B) comercializadas no Estado do Amapá. Os carvões das marcas A (resíduos de madeira de *Acacia mangium*) e B (resíduos de serragem de madeiras nativas mistas) apresentaram DRA de $0,543$ e $0,594 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Esses resultados são inferiores aos reportados para os carvões dos grupos 1 ($0,737 \text{ g cm}^{-3}$), 2 ($0,684 \text{ g cm}^{-3}$) e 4 ($0,599 \text{ g cm}^{-3}$), demonstrando que os carvões de madeiras residuais segregadas apresentam maior qualidade, o que é importante para a indústria siderúrgica.

Os valores médios de DRA por grupo estão correlacionados com os valores de densidade básica ponderada das madeiras originais ($r = 0,94$) que foram carbonizadas (Figura 13). Correlações positivas entre a densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente do carvão foram reportadas em estudos prévios (ANDRADE et al., 2018; LOUREIRO et al., 2019; LIMA et al., 2020b). Assim, o menor valor médio de DRA reportado para o grupo 3 é explicado pela densidade básica das madeiras que foram utilizadas na produção do carvão vegetal, essencialmente madeiras leves ($< 0,5 \text{ g cm}^{-3}$). Os valores de densidade básica das espécies *A. giganteum* ($0,486 \text{ g cm}^{-3}$), *C. oblongifolia* ($0,537 \text{ g cm}^{-3}$), *Ocotea* sp. 1 ($0,451 \text{ g cm}^{-3}$), *Ocotea* sp. 2 ($0,470 \text{ g cm}^{-3}$) e *Pouteria* sp. 2 ($0,667 \text{ g cm}^{-3}$) foram discriminados no estudo de Lima (2020). Em resumo, os carvões produzidos por esse grupo, podem ser

comercializados com base no volume, enquanto os carvões dos grupos 1, 2 e 4, que são superiores aos carvões do grupo 5, são adequados para comercialização com base na massa.

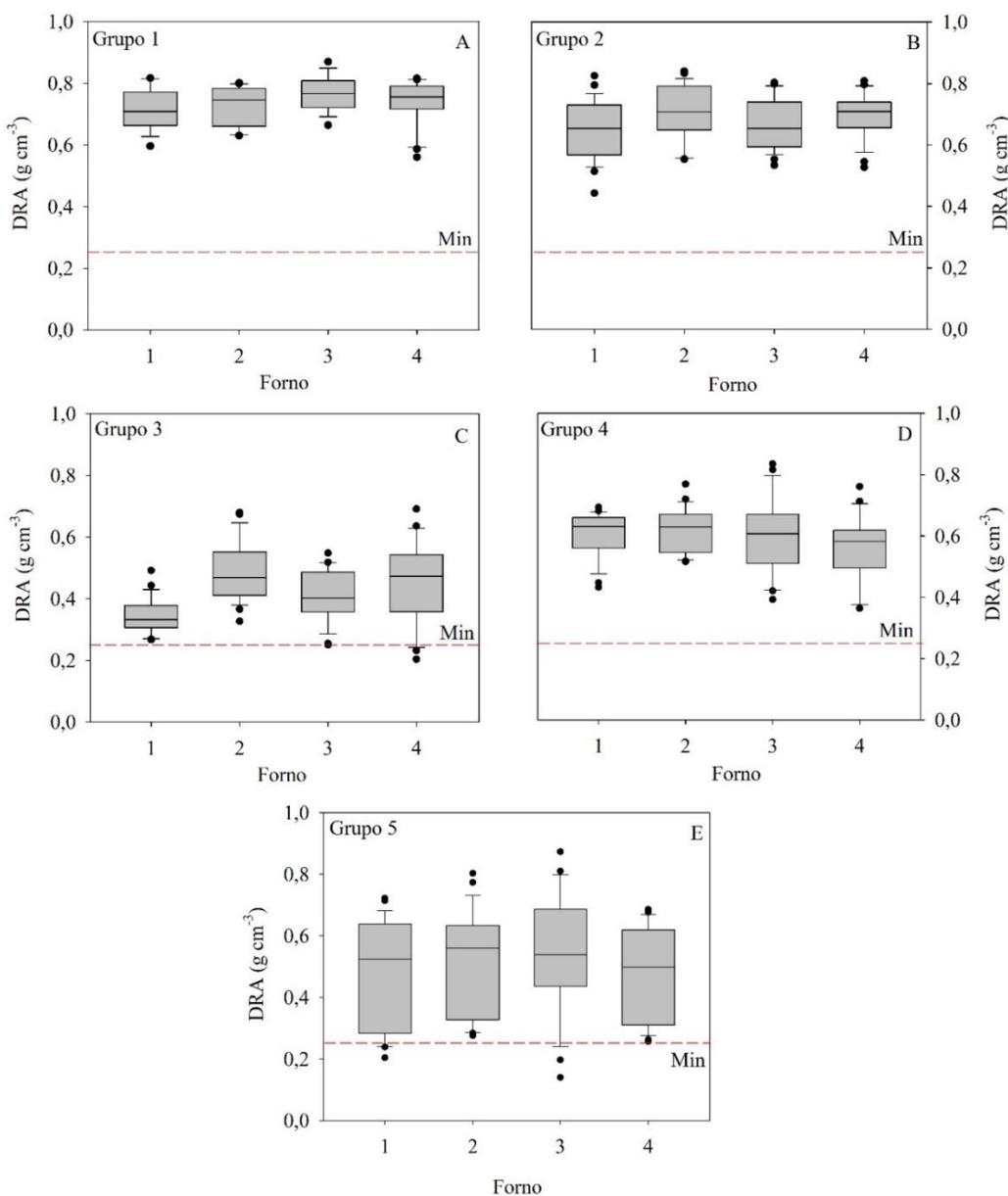
Figura 13 – Relação entre a densidade básica ponderada das madeiras (DBp) e a densidade relativa aparente do carvão vegetal de grupos de espécies segregadas e não segregadas por forno de alvenaria.



Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
▼ Forno 1	▲ Forno 1	● Forno 1	◆ Forno 1	■ Forno 1
▽ Forno 2	△ Forno 2	● Forno 2	◇ Forno 2	■ Forno 2
▼ Forno 3	▲ Forno 3	● Forno 3	◆ Forno 3	■ Forno 3
▽ Forno 4	△ Forno 4	● Forno 4	◆ Forno 4	■ Forno 4

O coeficiente de variação (CV) e o alto intervalo de quartil dos boxplots podem evidenciar a alta variabilidade da DRA dos carvões vegetais entre fornos de alvenaria dos grupos 3 (CV = 25,1%) e 5 (CV = 34,3%) (Figura 14). Essa variação foi mais intensa para os carvões de madeiras não segregadas (grupo 5). Por outro lado, a variabilidade entre fornos foi menor nos grupos 1 (CV = 8,7%), 2 (CV = 12,7%) e 4 (CV = 15,9%). Nesse estudo, valores de DRA abaixo de $0,250 \text{ g cm}^{-3}$ foram reportados no forno 4 do grupo 3 e nos fornos 1 e 3 do grupo 5. Nesse último grupo, enquanto o forno 4 apresentou DRA variando de $0,257$ a $0,685 \text{ g cm}^{-3}$, diferença de $0,428 \text{ g cm}^{-3}$, o forno 3 teve a variação mais intensa, de $0,140$ a $0,873 \text{ g cm}^{-3}$, significa uma diferença de $0,733 \text{ g cm}^{-3}$.

Figura 14 – Densidade relativa aparente dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D) e 5 (E) por forno de alvenaria.



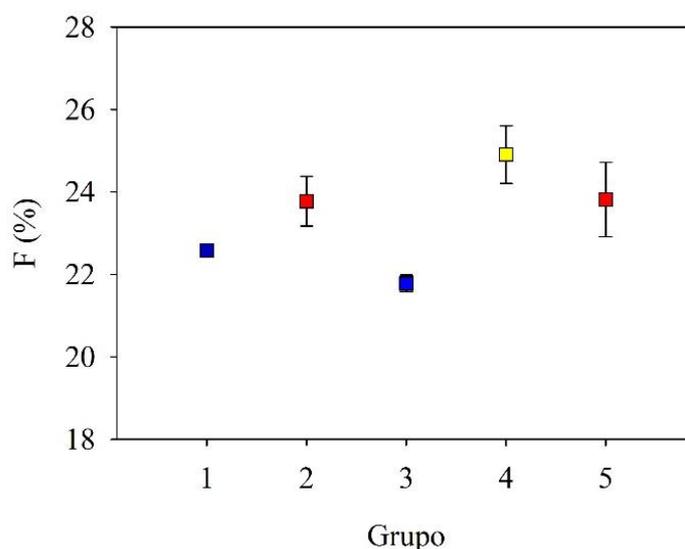
Os grupos 1, 2 e 4 apresentaram menores variações de DRA entre fornos pois as propriedades tecnológicas dessas madeiras são mais similares, o que contribuiu para uma carbonização mais controlada e homogênea, se comparada a carbonização do grupo 5, que apresenta madeiras com ampla variação das propriedades físicas e químicas. Assim, a produção de carvão vegetal com madeiras não separadas pode culminar em redução da qualidade do biorredutor. Na prática, o uso dos carvões heterogêneos produzidos no forno 3 (DRA: 0,140 – 0,873 g cm^{-3}) do grupo 5 culminaria em menores tempos de residência da carga metálica no interior da zona de reserva térmica do alto-forno, reduções na qualidade do

ferro gusa e na eficiência dos altos-fornos, bem como aumento do consumo específico de carvão vegetal para produção de uma tonelada de ferro gusa.

5.3.2 Efeito da segregação na friabilidade do carvão vegetal

O teste de Scott-Knott demonstrou efeito significativo da segregação das madeiras residuais sob a friabilidade (F) dos carvões vegetais (Figura 15). Os valores médios variaram de 21,8 (grupo 3) a 24,9% (grupo 4). Observa-se que os grupos 1 e 3 são semelhantes com base no teste de médias adotado, assim como os grupos 2 e 5. O grupo que representa a carbonização convencional (5) apresentou o segundo maior valor de F (23,8%), bem como a maior variação expressa pelo desvio-padrão de $\pm 0,9\%$. Considerando a classificação da friabilidade proposta por Oliveira et al. (1982), todos os carvões produzidos apresentam friabilidade média.

Figura 15 – Friabilidade dos carvões vegetais de madeiras residuais por grupo de espécies. Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.



A friabilidade é uma importante propriedade do carvão vegetal utilizada nos estudos especialmente para inferir sobre sua resistência mecânica. Essa característica está relacionada a propensão do carvão vegetal em se fragmentar em frações de menores dimensões devido a ação combinada de abrasão e choques, especialmente durante o manuseio (DUFOURNY et al., 2019; SILVA; ATAÍDE, 2019). Ocorre o rompimento de fissuras e trincas preexistentes no carvão inerentes ao processo de carbonização (SOARES et al., 2021). Carvão altamente friável pode limitar importantes processos, como transporte, manuseio e descarte em altos-fornos siderúrgicos (ZAINUDDIN et al., 2014). Diversos fatores influenciam na geração de

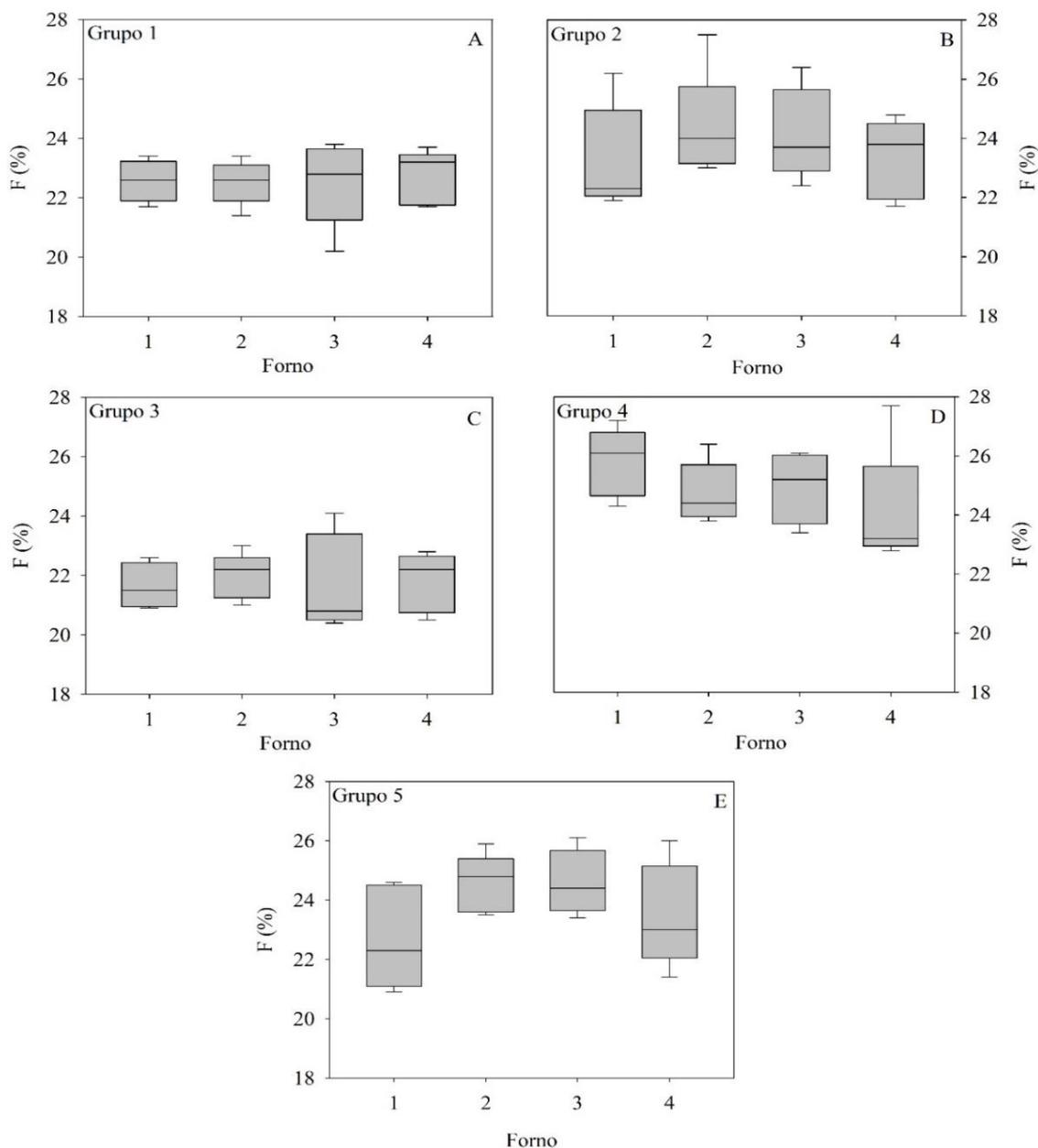
finos, como o diâmetro do torete (COUTINHO; FERRAZ, 1988), umidade da madeira (CANAL et al., 2020), parâmetros de processo (temperatura final de carbonização, rampa de aquecimento e taxa de resfriamento) (DUFOURNY et al., 2019; GOMES et al., 2020; SILVA; ATAÍDE, 2019), umidade (SILVA; ATAÍDE, 2019), densidade aparente, porosidade (RAMOS et al., 2019) e granulometria do carvão vegetal (SOARES et al., 2021).

Com base no estudo de Lima (2020), a variação do diâmetro dos toretes enfiados dos grupos 1 (0,354 – 0,450 m; Desvio-padrão = 0,046), 2 (0,273 – 0,404 m; Desvio-padrão = 0,046) e 3 (0,265 – 0,634 m; Desvio-padrão = 0,115) se mostrou menor se comparado a variação das madeiras dos grupos 4 (0,111 – 0,702 m; Desvio-padrão = 0,123) e 5 (0,123 – 0,760 m; Desvio-padrão = 0,143). Acredita-se que devido esta alta variabilidade do diâmetro pode ter aumentado a friabilidade do carvão vegetal dos grupos 4 e 5. Coutinho & Ferraz (1988) demonstraram que a classe de madeira com maior diâmetro (17,5 – 20 cm) demonstrou maior friabilidade do que a classe de menor diâmetro (7,5 – 10 cm). Pinheiro (2013) reportou que carvões vegetais com maior densidade oriundo de madeiras de maior diâmetro tiveram redução na resistência, o que foi associado as maiores áreas de cerne. Nessa condição, o tecido apresenta menor permeabilidade e é mais propício a formação de trincas e fissuras durante a carbonização, pela saída de gases.

A carbonização empírica é outro fator que pode ter influenciado a friabilidade dos carvões do grupo 4, composto por 12 espécies. Como apresentado por Dufourny et al. (2019) e Silva & Ataíde (2019), a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento afeta a friabilidade do carvão vegetal. Dessa forma, acredita-se que o maior controle do diâmetro do torete e dos parâmetros da carbonização em fornos de alvenaria na Amazônia pode maximizar os rendimentos da carbonização e a qualidade do bioredutor produzido.

A variabilidade da friabilidade dos grupos de carvões por fornos de alvenaria pode ser evidenciada na Figura 16. Os grupos 1 (CV = 4,1%) e 3 (4,7%) se mostraram mais homogêneos se comparados aos demais grupos. Com relação aos boxplots, os grupos 2 (CV = 6,6%), 4 (CV = 5,8%) e 5 (CV = 6,6%) apresentaram os maiores intervalos de quartil. O forno 3 (20,2 – 23,8%) do grupo 1, fornos 1 (21,9 – 26,2%), 2 (23,0 – 24,5%) e 3 (22,4 – 26,4%) do grupo 2, forno 4 (22,8 – 27,7%) do grupo 4 e fornos 1 (20,9 – 24,6%) e 4 (21,4 – 26,0%) do grupo 5 apresentaram as maiores variações.

Figura 16 – Friabilidade dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D) e 5 (E) por forno de alvenaria.



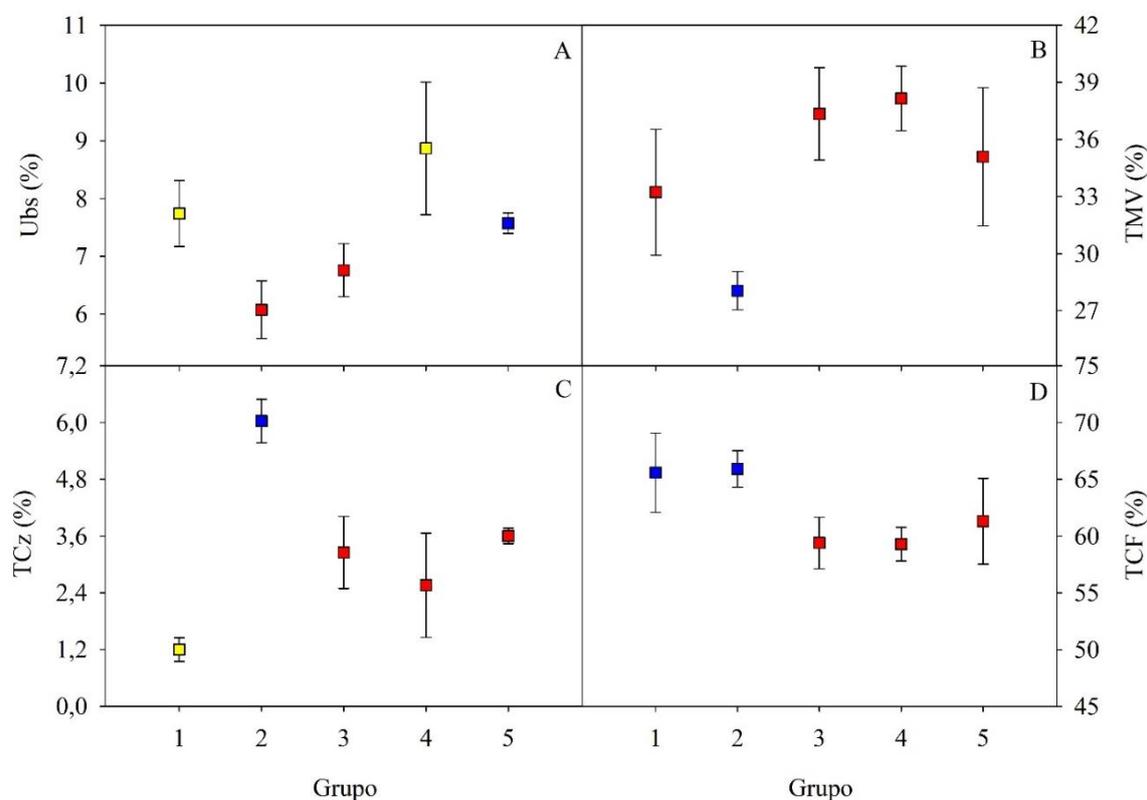
A alta variabilidade verificada na friabilidade influenciou negativamente a qualidade do carvão vegetal dos resíduos estudadas, culminando em carvões mais friáveis e menos resistentes do ponto de vista mecânico. Com base na classificação de Oliveira et al. (1982), os fornos em que foram carbonizadas as madeiras dos grupos 1 e 3 culminaram em carvões de média friabilidade. Os grupos 2, 4 e 5 apresentaram carvões com classificação de média friabilidade e carvões bastante friáveis. Como demonstrado anteriormente, o controle do diâmetro dos toretes e de variáveis do processo de carbonização, como a taxa de aquecimento e a temperatura final de carbonização, são soluções importantes visando à redução da

friabilidade do carvão vegetal e a melhoria da qualidade do biorredutor siderúrgico. Em resumo, os carvões produzidos pelo grupo 1 e 3 apresentaram friabilidade mais adequada para a siderurgia; contudo, é um resultado que pode ser melhorado com o maior controle da matéria prima e do processo.

5.3.3 Efeito da segregação na constituição química imediata do carvão vegetal

A segregação das madeiras em grupos com propriedades similares influenciou a análise química imediata dos carvões derivados. Variações importantes foram verificadas para umidade (Ubs: 6,07 – 8,87%), teor de materiais voláteis (TMV: 28,05 – 38,15%, base seca), teor de cinzas (TCz: 1,20 – 6,03%, base seca) e teor de carbono fixo (TCF: 59,29 – 65,91%, base seca) (Figura 17).

Figura 17 – Análise química imediata dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1, 2, 3, 4 e 5 por forno de alvenaria. Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.



Os resultados desse estudo indicam que os grupos 1 e 2 se destacaram quanto aos valores de Ubs, TMV e TCF. Comparativamente ao grupo 5 (testemunha), os grupos 1 e 2 foram superiores no TCF em 7,0% e 7,5%, respectivamente. Por outro lado, o grupo 2 apresentou o maior valor médio de TCz (6,03%), o que reduz as propriedades energéticas do

bioredutor e a resistência mecânica do ferro gusa causada pelo fenômeno da segregação, que acumula minerais no centro do metal solidificado (LIMA et al., 2020b).

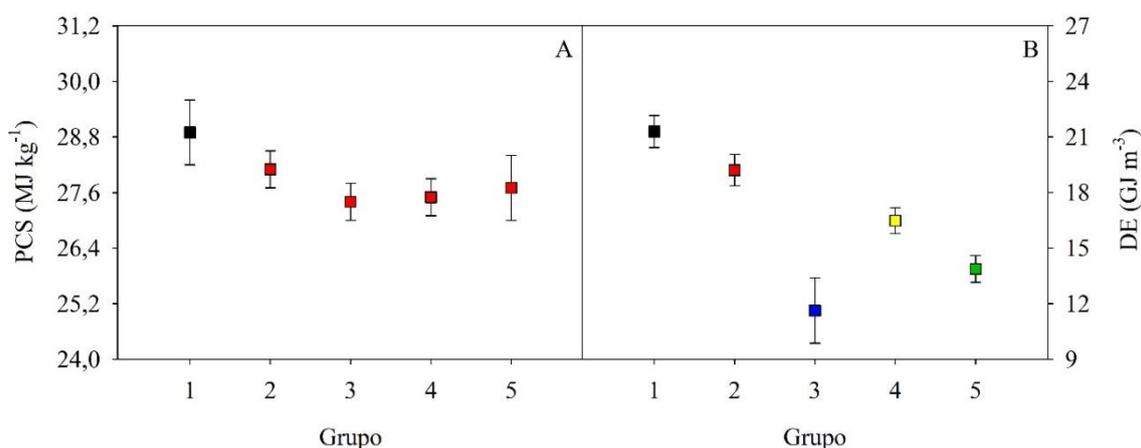
Os carvões do grupo 1 são os mais adequados para a indústria por fornecer menos cinzas e mais carbono, principal elemento necessário para a redução do ferro durante a produção de gusa (SILVA et al., 2020a). Na literatura, carvões das espécies *L. canescens* e *P. rodolphii* apresentaram o TCz de 9,60 e 3,40% (LIMA et al., 2020b), respectivamente, corroborando o alto valor de TCz reportado para o grupo 2. O segundo maior valor médio de TCz (3,60%) foi verificado para os carvões produzidos sem segregação de espécies, credenciando os grupos 1 (1,20%), 3 (3,25%) e 4 (2,56%) para o uso industrial.

Os valores de TCF dos grupos foram inferiores ao destacado na literatura como adequado (75 - 80%) para a finalidade siderúrgica (PEREIRA et al., 2016). Essa propriedade química foi afetada pela baixa tecnologia empregada nos fornos de alvenaria do tipo rabo quente e pela condução do processo, ainda realizado de forma empírica. Além disso, esses resultados são de madeiras de diversas espécies nativas que não apresentam melhoramento genético. Lima et al. (2020b) reportaram faixa de carbono fixo de carvões de resíduos madeireiros de vinte espécies tropicais produzidos em laboratório variando de 67,2 (*Licania canescens*) a 75,3% (*Enterolobium schomburgkii*). Nesse estudo, 18 espécies (90%) apresentaram carbono fixo abaixo de 75%, mesmo em condições ideais de carbonização. Embora os carvões de resíduos apresentem valores de carbono fixo abaixo do ideal, são carvões naturalmente mais densos que os carvões de eucalipto.

5.3.4 Efeito da segregação nas propriedades energéticas do carvão vegetal

O teste de Scott-Knott demonstrou que as propriedades energéticas dos carvões vegetais dos grupos de espécies foram influenciadas pela segregação (Figura 18). O poder calorífico superior (PCS: 27,4 – 28,9 MJ kg⁻¹) e a densidade energética (DE: 11,6 – 21,3 GJ m⁻³) apresentaram variação significativa nos valores médios entre os grupos.

Figura 18 – Poder calorífico superior (A) e densidade energética dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1, 2, 3, 4 e 5 por forno de alvenaria. Cores diferentes nas caixas indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.



O PCS é uma das propriedades energéticas mais importantes para simulações em sistemas de conversão. Essa propriedade define o conteúdo energético produzido pela queima de um combustível (SHENG; AZEVEDO, 2005). Com base nos resultados apresentados anteriormente, a queima de carvões de *D. excelsa* em altos-fornos siderúrgicos liberará a maior quantidade de energia na forma de calor, se comparado aos demais grupos. Esse resultado está relacionado ao elevado TCF (65,6%) verificado para os carvões desse grupo. Os grupos 2 (28,1 MJ kg⁻¹), 3 (27,4 MJ kg⁻¹), 4 (27,5 MJ kg⁻¹) e 5 (27,7 MJ kg⁻¹) apresentaram as menores médias de PCS, que podem estar relacionadas aos teores de cinzas, que foram maiores ao reportado para o grupo 1. Sabe-se que as cinzas no carvão podem reduzir as propriedades energéticas e a resistência mecânica do combustível, pois não participa da combustão (LIMA et al., 2020b). Ahmad & Subawi (2013) reportaram correlações negativas entre o PCS e TCz, corroborando os resultados apresentados.

A DE representa o conteúdo de energia estocada por unidade de volume (SILVA et al., 2018). Os carvões do grupo 5 apresentaram a menor média de DE, o que implica na baixa qualidade energética desse grupo em comparação aos demais. O uso de carvões dos grupos 1, 2 e 4 na indústria siderúrgica pode aumentar a quantidade de energia liberada dentro do reator de volume fixo, culminando em economia de matéria prima. O valor da DE foi mais influenciada pela DRA do que pelo PCS, devido a amplitude da variação. Além disso, o coeficiente de correlação de Pearson entre a DRA e DE ($r = 0,99$) foi maior do que o coeficiente reportado entre PCS e DE ($r = 0,71$).

Em resumo, a segregação das espécies em grupos demonstrou resultados positivos para a produção energética oriunda da queima de carvões vegetais, que pode ser determinante

para a performance desse biorredutor dentro dos altos-fornos siderúrgicos. Percebe-se que o agrupamento de espécies contribui para a maximização energética dos resíduos do manejo florestal, elevando a energia liberada pela combustão desse importante insumo. Esses achados são importantes, pois a indústria siderúrgica na região Amazônia requer carvão vegetal de alta qualidade e de origem legalizada para os processos relacionados a redução do minério de ferro. Embora a técnica de segregação melhore a qualidade do carvão vegetal, é importante que o custo operacional adicional de separação de madeiras e o controle do processo seja envolvido no valor do produto comercializado, pois se trata de matéria prima de qualidade e de origem legalizada.

5.4 Conclusões

O estudo revelou que a carbonização em fornos de alvenaria de resíduos madeireiros do manejo florestal previamente segregados apresentou melhor qualidade do carvão vegetal produzido, especificamente em termos físicos.

A densidade relativa aparente, friabilidade, teor de cinzas, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e densidade energética foram as propriedades melhoradas pela segregação da matéria prima em condições operacionais.

A carbonização de madeiras não segregadas se mostrou muito variável, culminando na produção de carvões mais friáveis e menos resistentes do ponto de vista mecânico.

Finalmente, os estudos futuros com resíduos do manejo devem considerar como fator de variação o diâmetro dos toretes na carbonização em fornos de alvenaria. Além disso, controlar as carbonizações com base na temperatura.

Referências

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6923**: carvão vegetal - amostragem e preparação da amostra, Rio de Janeiro, 1981.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11941**: madeira - determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.
- AHMAD, M.; SUBAWI, H. New Van Krevelen diagram and its correlation with the heating value of biomass. **Research Journal of Agricultural and Environmental Management**, v. 2 p. 295–301, 2013.
- ANDRADE, F.W.C.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOUTINHO, V.H.P. Influence of wood physical properties on charcoal from *Eucalyptus* spp. **Floresta e Ambiente**, v. 25, p. e20150176, 2018.

ARAÚJO, A. C. C.; COSTA, L. J.; BRAGA, P. P. C.; GUIMARÃES NETO, R. M.; ROCHA, M. F. V.; TRUGILHO, P. F. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, p. 1-9, 2018.

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, p. 519–536, 2016.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D1762-84 - Standard test method for chemical analysis of wood charcoal**. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2013.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Instrução normativa MMA nº 5 de 11/12/2006**. Dispõe dos procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS nas florestas primitivas e suas formas, Brasil, 2006.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n. 181, 1993. 6 p.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. C. O.; FIALHO, L. F.; DONATO, D. B. Impact of wood moisture in charcoal production and quality. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 1, p. e20170999, 2020.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Modernização da produção de carvão vegetal**: subsídios para revisão do Plano Siderurgia. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015.

CORDERO, T.; MARQUEZ, F.; RODRIGUEZ-MIRASOL, J.; RODRIGUEZ, J. J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. **Fuel**, v. 80, p. 1567–1571, 2001.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, 2014.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **IPEF**, n. 38, p. 33-37, 1988.

- 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 agent. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 137, p. 1-13, 2019.
- FORTALEZA, A. P.; NASCIMENTO FILHO, J. J. P.; CERETTA, R. P. S.; BARROS, D. S.; SILVA, S. S. Forest species biomass for the production of charcoal. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1436–1451, 2019.
- GOMES, A. F.; MARTINS, M. A.; PEREIRA, E. G.; SANTOS, I. S.; CARNEIRO, A. C. O. Quality of charcoal submitted to different cooling rates with heat exchanger. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 677-687, 2020.
- IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2020**: ano base 2019. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>> Acesso em: 22 out. 2020.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da extração vegetal e da silvicultura 2019**. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2019_v34_informativo.pdf>. Acesso em: 22 out. 2020.
- LIMA, M. D. R. **A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na Amazônia Brasileira**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, 205p. 2020.
- LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JÚNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, p. 105660, 2020a.
- LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, n. 142, p. e105804, 2020b.
- LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JUNIOR, U. O.; SILVA, R. C. C.; BUFALINO, L.; NUMAZAWA, S.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P.. Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. **Renewable Energy**, v. 163, p. 792–806, 2021.
- LOUREIRO, B. A.; VIEIRA, T. A. S.; COSTA, L. J.; SILVA, A. B.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P.F. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas-Ciencia y Tecnología**, v. 21, p. 619–630, 2019.

- MORAIS, W. W. C.; BRITO, J. O.; LANA, A. Q.; DIAS JÚNIOR, A. F.; MORAIS, J. B. F. Investigating waste generated from logging in the Amazon for energy use. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 132, p. e3712, 2021.
- OLIVEIRA FILHO, D.; TEIXEIRA, C. A.; SILVA, J. S. E.; REIS, H. O.; VOROBIEFF, C. L. Resfriamento rápido de fornos de carbonização. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p.1023-1032, 2010.
- OLIVEIRA, J. B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Production of charcoal: technical aspects. In: Penedo, W. R. (Ed.) **Production and use of charcoal**. Belo Horizonte: CETEC, p. 59 – 73, 1982.
- PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, p. 4574-4592, 2013.
- PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.
- PEREIRA, A. A.; LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; NUMAZAWA, S.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO, T. P. Grouping of wood residues from sustainable forest management aiming at bioenergy generation. **Scientia Forestalis**, v. 48, p. 1–14, 2020.
- PICANCIO, A. C. S.; ISBAEX, C.; SILVA, M. L.; SILVA, M. L.; SALLES, T. T.; RÊGO, L. J. S.; SILVA, L. F. Controle do processo de produção de carvão vegetal parasiderurgia. **Caderno de Administração**, v. 12, n. 1, p. 1-17, 2018.
- PINHEIRO, M. A. **Influência das dimensões da madeira na secagem e nas propriedades do carvão vegetal**. 2013. 69 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; MIRMEHDI, S.; SILVA, M. G. Qualidade e avaliação energética do carvão vegetal dos resíduos do coco babaçu para uso siderúrgico. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 5, p. 435-444, 2014.
- R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.
- RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TANGSTAD, M.; SAADIEH, R.; PEREIRA, B. L. C. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for metallurgical use. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 2, p. e20180435, 2019.

- RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 2019, v. 143 p. 104670, 2019.
- SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FÓRUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: UFMG, 2008.
- SHENG, C.; AZEVEDO, J. L. T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, p. 499-507, 2005.
- SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: product yields and characterization. **Energy**, v. 172, 509–516, 2019.
- SILVA, L. F. F.; CASTRO, A. R. S.; OLIVEIRA, R. S.; SILVA, S. S.; PAMPLONA, V. M. S.; BARROS, D. S.; NOBRE, J. R. C.; NUMAZAWA. Seleção de espécie, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 40, p. e201801737, p. 1-11, 2020a.
- SILVA, M. F.; FORTES, M. F.; SETTE JUNIOR, C. R. Characteristics of wood and charcoal from Eucalyptus clones. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, p. e20160350, 2018.
- SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. Charcoal from timber industry residues of three tree species logged in the municipality of Paragominas, PA. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 61–70, 2007.
- SILVA, M. R. S.; RIBEIRO, E. A.S.; BARBOSA, J. P.; ALVES JÚNIOR, F. T.; GUEDES, M. C.; PINHEIRO, P. G.; BUFALINO, L. Quality attributes of commercial charcoals produced in Amapá, a Brazilian state located in the Amazonia. **Environmental, Development and Sustainability**, v. 22, n. 3, p. 1-14, 2020b.
- SOARES, J. D.; PAULA, M. O.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, L. J.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Parameters to determine mechanical strength of charcoal in a hydraulic press. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 4, p. e9096, 2021.
- UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Bioenergia**, v. 14, p. 67–85, 2008.
- ZAINUDDIN MF, ROSNAH S, NORIZNAN MM, DAHLAN I. Effect of moisture content on physical properties of animal feed pellets from pineapple plant waste. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 2, p. 224-230, 2014.

6 CAPÍTULO 2 - COMBUSTIBILIDADE DOS CARVÕES VEGETAIS PRODUZIDOS A PARTIR DA SEGREGAÇÃO DOS RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA ORIENTAL

Resumo

Esse estudo objetivou esclarecer os efeitos da segregação de resíduos da Amazônia na combustibilidade e combustão espontânea dos carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria. Resíduos de vinte e três espécies tropicais foram utilizados nessa pesquisa, em que foram segregados em quatro grupos com características similares. Esses grupos foram comparados com a carbonização tradicional, em que não há segregação de madeiras. Os carvões foram avaliados quanto aos parâmetros de combustão, índices térmicos e ocorrência de autocombustão. Os grupos 1 e 4 apresentaram os maiores valores médios para temperatura de ignição (380°C), temperatura de burnout (547°C), temperatura em que ocorre maior perda de massa (515°C) e tempos de ignição (33,39 min). O grupo 5 produziu carvões com baixa temperatura de ignição (361,65°C) e baixa taxa máxima de combustão (9,54 % min⁻¹), indicando uma maior dificuldade de queima. Os carvões dos grupos 1 e 4, por não apresentarem combustão espontânea podem ser transportados sem riscos de segurança, enquanto os carvões dos grupos 2, 3 e 5 se adequam a classe 2 da resolução 420 da Agência Nacional de Transportes Terrestres. Portanto, a segregação das madeiras residuais promoveu resultados importantes quanto a combustibilidade e combustão espontânea de carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria. O maior controle do processo e da matéria prima, em termos de umidade, poderia maximizar os efeitos positivos da segregação na combustibilidade e combustão do carvão vegetal.

Palavras-chave: madeira residual, carbonização, perfil térmico, autocombustão, ignição.

6.1 Introdução

O carvão vegetal é obtido a partir da carbonização da madeira e é considerada uma das fontes de energia limpa mais utilizada no Brasil. O carvão é empregado em diversos setores da indústria, principalmente na metalúrgica e em alto-forno siderúrgico. Além do uso industrial, é muito utilizado para finalidade doméstica como combustível em churrasqueiras e fogões a lenha. Segundo o relatório IBÁ (2019) uma parcela significativa da produção de carvão vegetal do Brasil é destinada ao setor siderúrgico, principalmente para produção de ferro e aço. O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo, contribuindo com 12%

da produção mundial (IBÁ, 2020). A produção de carvão no Brasil é majoritariamente oriunda de florestas plantadas, especialmente com espécies do gênero *Eucalyptus*, o que reforça o caráter renovável dessa matéria-prima.

Além das madeiras de *Eucalyptus*, outras biomassas são utilizadas para geração de energia, como os resíduos florestais (LIMA et al., 2020a; LIMA et al., 2020b) e agrícolas (COSTA et al., 2020). A produção de carvão vegetal na Amazônia é abastecida principalmente com matéria prima de florestas energéticas, resíduos madeireiros produzidos em planos de manejo florestal sustentável e resíduos do processamento mecânico de toras em serrarias.

Os planos de manejo florestal sustentável (PMFS), instrumento legal que permite o uso racional de produtos florestais madeireiros e não madeireiros na Amazônia, é regido pelo Código Florestal Brasileiro, Lei Federal nº 12.727/2012 (BRASIL, 2012). Além desse dispositivo, o Estado do Pará regulamenta o manejo florestal por meio da Instrução Normativa nº 05 publicada em 11 de setembro de 2015 (PARÁ, 2015). Embora essa atividade seja instrumentada visando a redução dos impactos da exploração certificada sob as florestas, ainda assim são gerados resíduos lenhosos, como galhos, raízes e restos de troncos.

Estima-se que para cada tonelada de madeira colhida, em PMFS na Amazônia com intensidade de corte máxima de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, são geradas 2,13 toneladas de resíduos madeireiros (NUMAZAWA et al., 2017). Essa matéria prima, embora muito heterogênea devido a origem, formato e espécies que a compõe, são promissoras para produção energética, especialmente para produção de carvão vegetal (LIMA et al., 2020a). O Estado do Pará, prevê o aproveitamento desses resíduos por parte dos detentores dos PMFS. O uso dessa matéria prima configura maior aproveitamento dos recursos florestais oriundos de PMFS e elevação do quantitativo de combustíveis renováveis na matriz energética brasileira, gerando emprego e renda por um período maior.

A literatura apresenta estudos com estimativas de resíduos produzidos em PMFS (CRUZ FILHO; SILVA, 2009; KELLER et al., 2004; NUMAZAWA et al., 2017), estudos de caracterização de madeira (LIMA et al., 2020a; LIMA et al., 2021; PEREIRA et al., 2020) e carvão vegetal derivado (LIMA et al., 2020b). Contudo, a literatura carece de novas abordagens para essa matéria prima, especialmente no que tange aos carvões vegetais, como o estudo do perfil térmico e combustão espontânea.

As análises térmicas são importantes para entender as características fundamentais de pirólise do carvão vegetal e prever a sua performance em sistemas reais de combustão. Essas análises podem fornecer informações acerca da composição química, estabilidade térmica e

das faixas de temperatura em que a decomposição do carvão é mais pronunciada (SOARES, 2011). A literatura apresenta diversos estudos que avaliaram a combustibilidade de carvões minerais (coque), dentre eles o de Marinov et al. (2010), Idris et al. (2012), Shen et al. (2016) e Janković et al. (2019). Em contrapartida, poucos são os estudos térmicos com carvões vegetais reportados na literatura (PROTÁSIO et al., 2017; KLUSKA et al., 2020; MASSUQUE et al., 2021), principalmente com carvões de madeiras residuais da Amazônia, demonstrando carência de pesquisas.

Além da combustibilidade, esclarecer a ocorrência de combustão espontânea de carvões de resíduos é um avanço importante para o setor, implica em definir estratégias relevantes para o transporte e armazenamento desse insumo (BATISTELLA et al., 2016). Esse fenômeno químico ocorre mediante a reação de materiais combustíveis com o oxigênio, ocasionando uma lenta geração de calor, pelo qual os materiais elevam suas temperaturas, através de reações exotérmicas internas, e atingem temperaturas maiores do que o ambiente (ANTT, 2004). Esse processo pode acontecer durante o período de carbonização, após o fim do ciclo de carbonização e pelo manuseio inadequado do material (DIAS et al., 2002; ROHDE, 2005). O carvão vegetal é considerado um produto sujeito à combustão espontânea pela Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2004), sendo enquadrado na classe 4. O material pode ser dispensado desta legislação caso passe por um teste laboratorial que comprove que o combustível não está sujeito à combustão espontânea.

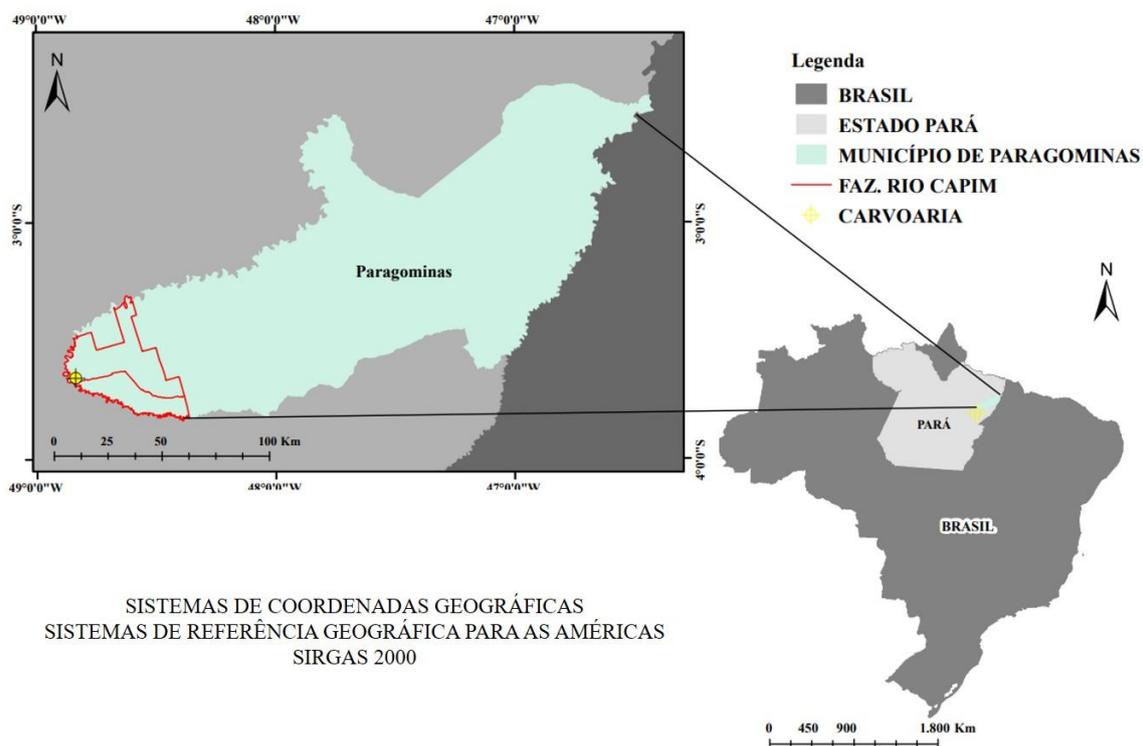
Portanto, os objetivos que nortearam esse estudo foram: (i) Entender o processo de combustão dos carvões vegetais; (ii) Correlacionar os resultados dos testes de combustão com as propriedades químicas (percentuais de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo); e (ii) Verificar se o carvão vegetal produzido pode ser transportado sem risco de combustão espontânea.

6.2 Material e métodos

6.2.1 Origem do carvão vegetal

Os carvões vegetais avaliados nesse estudo são oriundos de galhada de diferentes espécies florestais provenientes de plano de manejo florestal sustentável, previamente armazenadas na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim (UPC Rio Capim) (3°39'13,40" S e 48°50'16,90" O) pertencente ao Grupo Keilla, localizada no município de Paragominas, Estado do Pará (Figura 19).

Figura 19 – Localização da carvoaria da Fazenda Rio Capim, localizada na cidade de Paragominas, Estado do Pará.

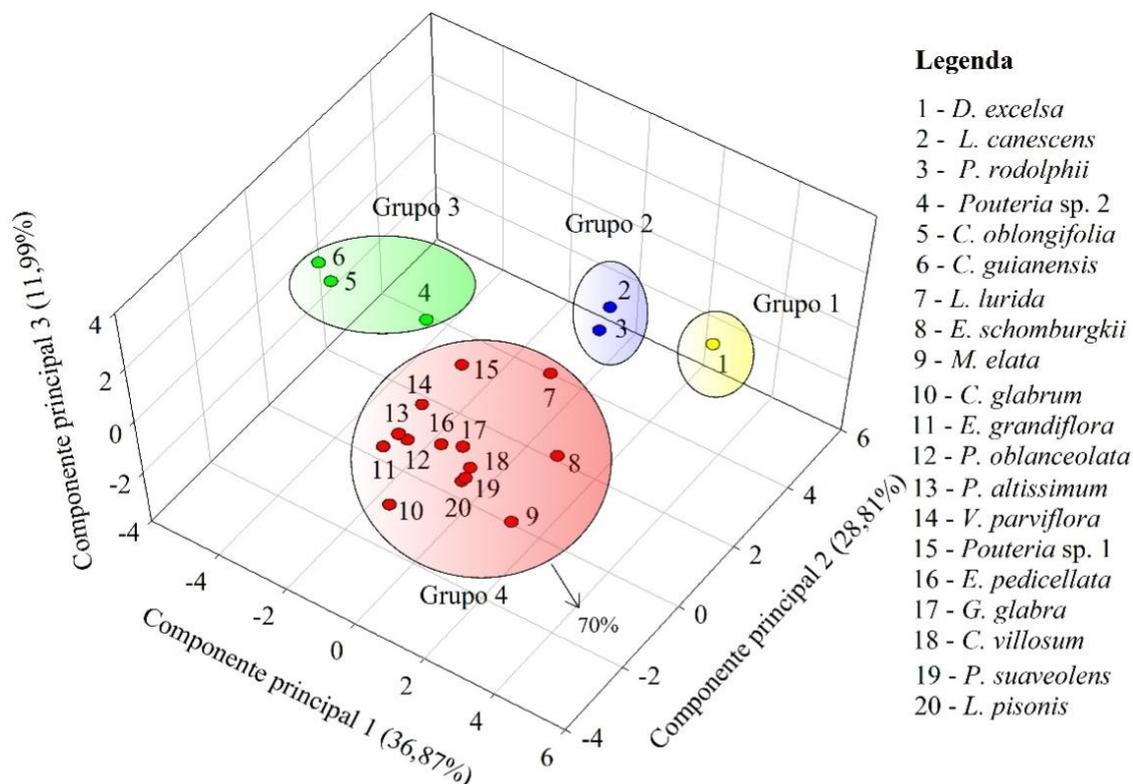


Fonte: Do autor.

6.2.2 Segregação das madeiras residuais para carbonização nos fornos de alvenaria

Pelo fato de na Amazônia existirem diferentes espécies florestais exploradas em regime de manejo florestal, foi realizada a segregação dos resíduos florestais, que se baseou nos estudos prévios de Lima et al. (2020a, 2020b), que avaliaram a qualidade da madeira dos resíduos madeireiros de 20 espécies comerciais manejadas na mesma área do presente estudo. Assim, foram adotados 4 grupos de madeiras com propriedades similares (Figura 20) segregadas com base em uma técnica estatística multivariada, denominada de Análise de Componentes Principais (ACP). Essa análise estatística considerou as propriedades físicas (densidade básica, umidade e máximo teor de umidade), químicas (imediate: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas; e molecular: extrativos totais, lignina solúvel, lignina insolúvel e lignina total), energéticas (poder calorífico superior e densidade energética) e o consumo específico de lenha na produção de carvão vegetal.

Figura 20 - Grupos de espécies para a carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.



Fonte: Lima (2020).

Os grupos apresentados pela ACP foram considerados na carbonização realizada na UPC Rio Capim. Na prática, as espécies foram previamente identificadas e agrupadas em pilhas de madeira com fitas por um identificador botânico e separadas nos devidos grupos em novas pilhas por uma carregadeira (Volvo L90 F). Todas as espécies utilizadas nesse estudo estão descritas na Tabela 3. Posteriormente, os resíduos foram seccionados por uma escavadeira florestal (CAT 320D FM Sotreq) com garra traçadora acoplada visando à obtenção de toretes com menores dimensões. Durante a etapa de seccionamento, foi realizada a amostragem das madeiras visando à retirada de corpos de prova com dimensões de 4 cm x 4 cm x 4 cm para a identificação na Xiloteca do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, localizada em Belém, Pará. Finalmente, os toretes foram levados para frente dos fornos com uma caçamba basculante (Iveco, modelo Tector 260E28) para serem carbonizadas.

Tabela 3 – Lista de espécies utilizadas na carbonização em fornos de alvenaria da Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.

N	Família	Nome científico	Nome comum	DB (g cm ⁻³)*
1	Anacardiaceae	<i>Anacardium giganteum</i> W.Hancock ex Engl.	Cajuaçu	0,486
2	Bursaceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	Breu-barrote	0,734
3		<i>Protium</i> sp.	Breu-amesclim	0,392
4	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiarana	0,667
5		<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá	0,639
6	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	Casca-Seca	0,841
7		<i>Parinari rodolphii</i> Huber	Coco-pau	0,830
8	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba	0,760
9	Humiriaceae	<i>Vantanea guianensis</i> Aubl.	Uxirana	0,843
10	Lauraceae	<i>Ocotea</i> sp. 1	Louro-amarelo	0,452
11		<i>Ocotea</i> sp. 2	Louro-preto	0,470
12	Lecythidaceae	<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	Tauari-branco	0,537
13		<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	Matamatá-branco	0,785
14		<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia	0,864
15		<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	Jarana	0,775
16	Leguminosae -Mimosoideae	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho	0,993
17		<i>Parkia gigantocarpa</i> Ducke	Fava-atanã	0,436
18		<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Timborana	0,631
19		<i>Vatairea sericea</i> (Ducke) Ducke	Angelim-amargoso	0,686
20	Sapotaceae	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba	0,911
21		<i>Pouteria</i> sp. 1	Abiorana	0,755
22		<i>Pouteria</i> sp. 2	Guajará-bolacha	0,667
23	Simaroubaceae	<i>Simarouba amara</i> Aubl.	Marupá	0,367

DB = densidade básica da madeira; *Fonte: Lima (2020).

Além dos quatro grupos de madeiras formado pela análise estatística, foi considerado um quinto grupo, como sendo a forma tradicional de carbonização na região. Esse grupo foi composto por todas as espécies estudadas (Tabela 4). Foram utilizados 4 fornos de alvenaria por grupo de madeira, totalizando 20 fornos, com ciclo de carbonização de 12, tempo este adotado pela empresa. Com relação às dimensões, os fornos foram padronizados com diâmetro da base de 3,20 m e altura de 2,5 m. Além disso, os fornos apresentavam em média 6 baianas na parte superior e 6 tatus na base do forno e uma chaminé para emissão dos gases com altura de 70 cm.

Tabela 4 - Grupos de espécies segregadas para a carbonização na carvoaria da Fazenda Rio Capim, cidade de Paragominas, Estado do Pará, Brasil.

Espécie	Grupo				
	1	2	3	4	5 (Tradicional)
<i>D. excelsa</i>	X				X
<i>P. rodolphii</i>		X			X
<i>L. canescens</i>		X			X
<i>A. giganteum</i>			X		X
<i>C. oblongifolia</i>			X		X
<i>Ocotea</i> sp.1			X		X
<i>Ocotea</i> sp.2			X		X
<i>Pouteria</i> sp.1				X	X
<i>Pouteria</i> sp.2			X		X
<i>V. sericea</i>				X	X
<i>P. altissimum</i>				X	X
<i>G. glabra</i>				X	X
<i>L. lurida</i>				X	X
<i>M. elata</i>				X	X
<i>E. coriacea</i>				X	X
<i>C. glabrum</i>				X	X
<i>C. villosum</i>				X	X
<i>L. pisonis</i>				X	X
<i>P. suaveolens</i>				X	X
<i>V. guianensis</i>				X	X
<i>P. gigantocarpa</i>					X
<i>Protium</i> sp.					X
<i>S. amara</i>					X

Células preenchidas com a cor cinza diz respeito as espécies que compõem os grupos para carbonização nos fornos de alvenaria.

6.2.3 Amostragem do carvão vegetal

Após as carbonizações, os carvões foram retirados dos fornos em caixas metálicas abertas na região frontal, com capacidade volumétrica de 9,7 m³. Ressalta-se que uma caixa metálica foi suficiente para acondicionar todo o carvão produzido em cada forno. As caixas após serem cheias com carvão, tiveram a região frontal fechada com tábuas para o transporte até o galpão, local onde o material foi amostrado. Foram retirados 5 sacos de ráfia de forma aleatória por caixa metálica, totalizando 100 sacos, com aproximadamente 20 kg de carvão vegetal, cada saco.

6.2.4 Qualidade do carvão vegetal

A composição química imediata (teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) e o poder calorífico superior foram as propriedades do carvão vegetal analisadas. As

propriedades do carvão foram previamente descritas no Capítulo 1 e seus valores médios podem ser visualizados na Tabela 5. A composição química imediata do carvão vegetal foi determinada a partir das amostras de carvão vegetal moídas e peneiradas, retidas em peneira de 60 *mesh* e, posteriormente, secas em estufa a 103 ± 2 °C, até massa constante, conforme a norma NBR 6923 (ABNT, 1981). A determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo foi realizada em duplicata com base na norma NBR 8112 (ABNT, 1986). O poder calorífico superior (PCS) dos carvões foi estimado por meio da Equação 2, ajustada ($R^2 = 0,93$) por Cordero et al. (2001).

$$\text{PCS} = (0,3543 \times \text{TCF}) + (0,1708 \times \text{TMV}) \quad (1)$$

Onde, PCS: poder calorífico superior (MJ m^{-3}); TCF: teor de carbono fixo (%); e TMV: teor de materiais voláteis (%).

Tabela 5 - Análise química imediata dos carvões vegetais de madeiras residuais segregadas em grupos de espécies.

Grupo	Ubs (%)	TMV (%)	TCz (%)	TCF (%)	PCS (MJ kg^{-1})
1	7,74 \pm 0,57 a	33,23 \pm 3,31 a	1,20 \pm 0,25 c	65,58 \pm 3,49 a	28,9 \pm 0,67 a
2	6,07 \pm 0,50 c	28,05 \pm 1,01 b	6,03 \pm 0,46 a	65,91 \pm 1,61 a	28,1 \pm 0,41 b
3	6,76 \pm 0,46 b	37,34 \pm 2,43 a	3,25 \pm 0,76 b	59,40 \pm 2,26 b	27,4 \pm 0,40 b
4	8,87 \pm 1,15 a	38,15 \pm 1,69 a	2,56 \pm 1,10 b	59,29 \pm 1,48 b	27,5 \pm 0,36 b
5	7,57 \pm 0,18 b	35,09 \pm 3,63 a	3,60 \pm 0,16 b	61,30 \pm 3,78 b	27,7 \pm 0,72 b

Ubs = umidade na base seca, TMV = teor de materiais voláteis, TCz = teor de cinzas e TCF = teor de carbono fixo. Média \pm desvio padrão. Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.

6.2.5 Análises térmicas dos carvões

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) e a análise térmica diferencial (DTA) foram realizadas nos carvões de madeiras residuais da Amazônia por meio do equipamento DTG-60H, da marca Shimadzu. Assim, foi utilizada uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹, desde a temperatura ambiente até 750 °C, em ar sintético ($20 \pm 5\%$ de oxigênio e $80 \pm 5\%$ de nitrogênio), com um fluxo de 100 mL.min⁻¹. Procedimento semelhante foi adotado por Xiong et al. (2014) e Arauzo et al. (2020); contudo utilizaram temperaturas finais acima de 750 °C.

A partir da análise conjunta das curvas de TGA, DTG e análise térmica diferencial (DTA), foi possível observar o número de etapas em que ocorreu a combustão do carvão.

As perdas de massa do carvão vegetal por classes de temperatura (25 - 100 °C, 100 - 200 °C, 200 - 300 °C, 300 - 400 °C, 400 - 500 °C, 500 - 600 °C e 600 - 700 °C) foram calculadas

subtraindo a massa inicial pela massa final da amostra de carvão vegetal. A temperatura final de 700°C foi definida devido a grande maioria dos grupos (2, 3, 4 e 5) terem perdido até essa temperatura o maior percentual de massa.

A temperatura de ignição (T_i), a temperatura de Burnout (T_b), a temperatura máxima de perda de massa ($T_{máx}$), a taxa máxima de combustão $[(dm/dt)_{máx}]$, a taxa média de combustão $[(dm/dt)_{média}]$ e o tempo de ignição foram os parâmetros da combustão avaliados. A taxa média de combustão foi calculada dividindo-se a perda de massa pelo tempo total da análise termogravimétrica. O índice de ignição (D_i), o índice característico da combustão (S) e o índice de inflamabilidade (C_i) foram calculados por meio das Equações 2, 3 (WANG, et al., 2011; MOON, et al., 2013) e 4 (ZOU et al., 2019).

$$D_i = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{máx}}{t_p \times t_{ig}} \quad (2)$$

$$S = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{máx} \left(\frac{dm}{dt}\right)_{média}}{T_i^2 \times T_b} \quad (3)$$

$$C_i = \frac{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{máx}}{T_i^2} \quad (4)$$

Onde: D_i é o índice de ignição ($\% \text{ min}^{-3}$); S é o índice característico da combustão ($\%^2 \text{ min}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-3}$); C_i é o índice de inflamabilidade ($\% \text{ min}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$); $(dm/dt)_{máx}$ é a taxa máxima de combustão ($\% \text{ min}^{-1}$); $(dm/dt)_{média}$ é a taxa média de combustão ($\% \text{ min}^{-1}$); T_i é a temperatura de ignição ($^\circ\text{C}$); T_b é a temperatura de burnout ($^\circ\text{C}$); t_p é o tempo correspondente para a taxa máxima de combustão (min); e, t_{ig} é o tempo de ignição (min).

6.2.6 Teste de combustão dos carvões vegetais

Para os testes de combustão foi utilizada a norma para classificação de substâncias sujeitas a combustão espontânea do Manual de Ensaios e Critérios de Recomendação Sobre o Transporte de Mercadorias Perigosas (ONU, 2009). A amostragem do carvão dos grupos de carvão foi realizada de acordo com a norma de amostragem do carvão vegetal NBR 6923 (ABNT, 1981). A análise foi realizada em triplicata por forno, em que foi priorizada amostra com granulometria $> 1 \text{ cm}$ e menor que 4-5 cm. Estes materiais foram aquecidos a 140 $^\circ\text{C}$ por até 24 horas em estufa de circulação de ar forçado. Utilizou-se dois termopares, um para monitorar a temperatura da amostra e o outro, a temperatura da estufa. Essas informações foram obtidas a cada 60 minutos.

6.2.7 Análises estatísticas

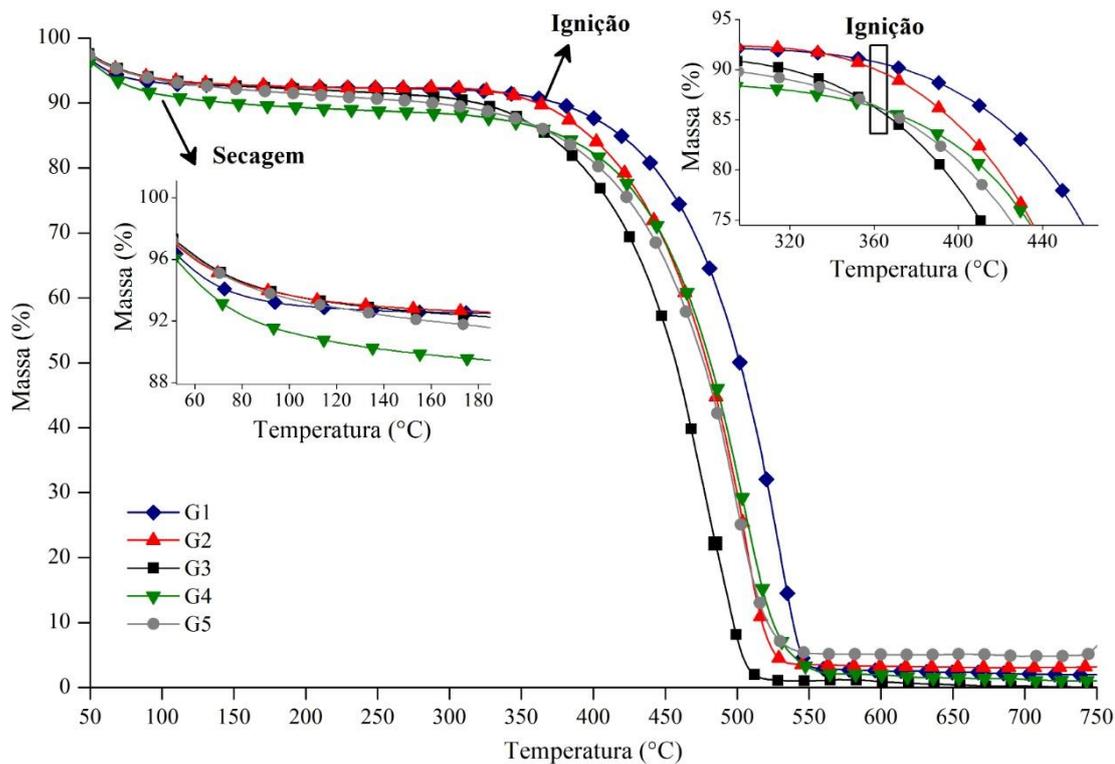
As análises estatísticas consistiram em análise de variância (ANAVA) e teste de comparação múltipla de médias. Antes da ANAVA, os pressupostos de normalidade de resíduos, homocedasticidade de variâncias e autocorrelação de resíduos foram analisados por meio do teste de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$), Bartlett ($p \leq 0,05$) e Durbin-Watson ($p \leq 0,05$), respectivamente. Para as comparações múltiplas das médias, o teste de Scott-Knott foi executado a um nível de significância de 5%. Todas as análises foram realizadas em linguagem R, versão 3.6.2 (R CORE TEAM, 2019).

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Perfil térmico dos carvões vegetais

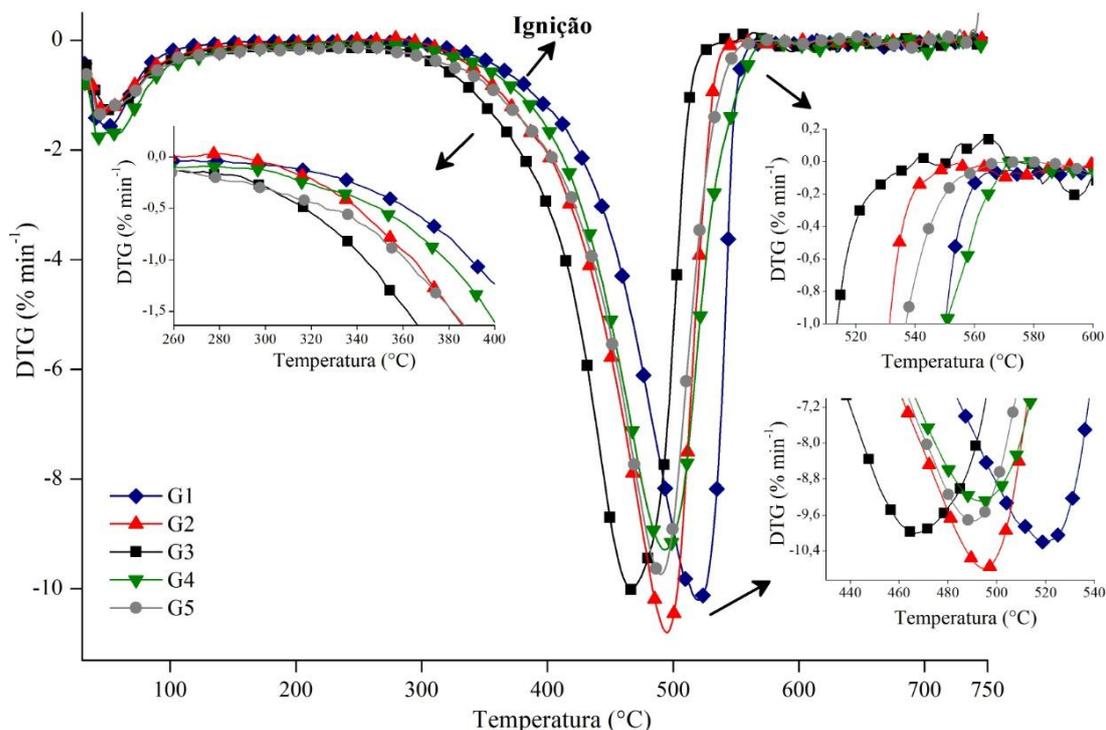
O comportamento da combustão dos carvões vegetais dos grupos de espécies simulado por meio de curvas TGA é evidenciado na Figura 21. A ordem decrescente dos grupos de espécies com maior estabilidade térmica durante a combustão é: 1, 2, 4, 5 e 3. Os carvões vegetais dos grupos mais estáveis termicamente (1, 2 e 4) apresentaram os menores valores de cinzas e maiores valores de materiais voláteis (ver Tabela 4), corroborando os resultados apresentados por Massuque et al. (2021) avaliando carvões de madeiras tropicais.

Figura 21 – Curvas termogravimétricas dos carvões de grupos de espécies produzidos em fornos de alvenaria.



A Figura 22 apresenta a curva DTG (primeira derivada da curva TGA) dos carvões vegetais de grupos de espécies produzidos em fornos de alvenaria. Os estágios da combustão podem ser visualizados por meio desse gráfico, em que a primeira perda de massa está associada ao processo de secagem do carvão vegetal que ocorre até 200°C. Nessa etapa, as maiores perdas de massa foram reportadas para os grupos 1 e 4 (Tabela 5) devido ao maior conteúdo de umidade (ver Tabela 4). Com o aumento da temperatura até 400 °C, os carvões perderam pouca massa em função da ignição e combustão de materiais voláteis, que é a fração química responsável por iniciar a combustão do carvão vegetal (MASSUQUE et al., 2021). Entre 460 (grupo 2) e 520°C (grupo 1) foi observada a terceira etapa, onde ocorre a maior perda de massa devido a combustão com maior intensidade promovida pela queima do carbono fixo. Acima de 520°C, todos os materiais orgânicos foram consumidos, restando as cinzas.

Figura 22 - Curva DTG dos carvões vegetais de grupos de espécies produzidos em fornos de alvenaria.



As maiores perdas de massa foram verificadas nas faixas de temperatura de 400 a 500°C e de 500 a 600°C (Tabela 6). Os grupos 2 (52,79%), 3 (65,80%) e 5 (53,59%) apresentaram as maiores perdas de massa entre as temperaturas de 400 e 500°C, enquanto o grupo 1 se destacou com o menor valor (38,58%). Na faixa de temperatura de 500 – 600°C, o grupo 1 apresentou o maior valor de perda de massa (44,97%). As maiores massas residuais foram reportadas para os grupos 2 e 5.

Tabela 6 - Perda de massa dos carvões vegetais em porcentagem por faixas de temperaturas durante o processo de combustão.

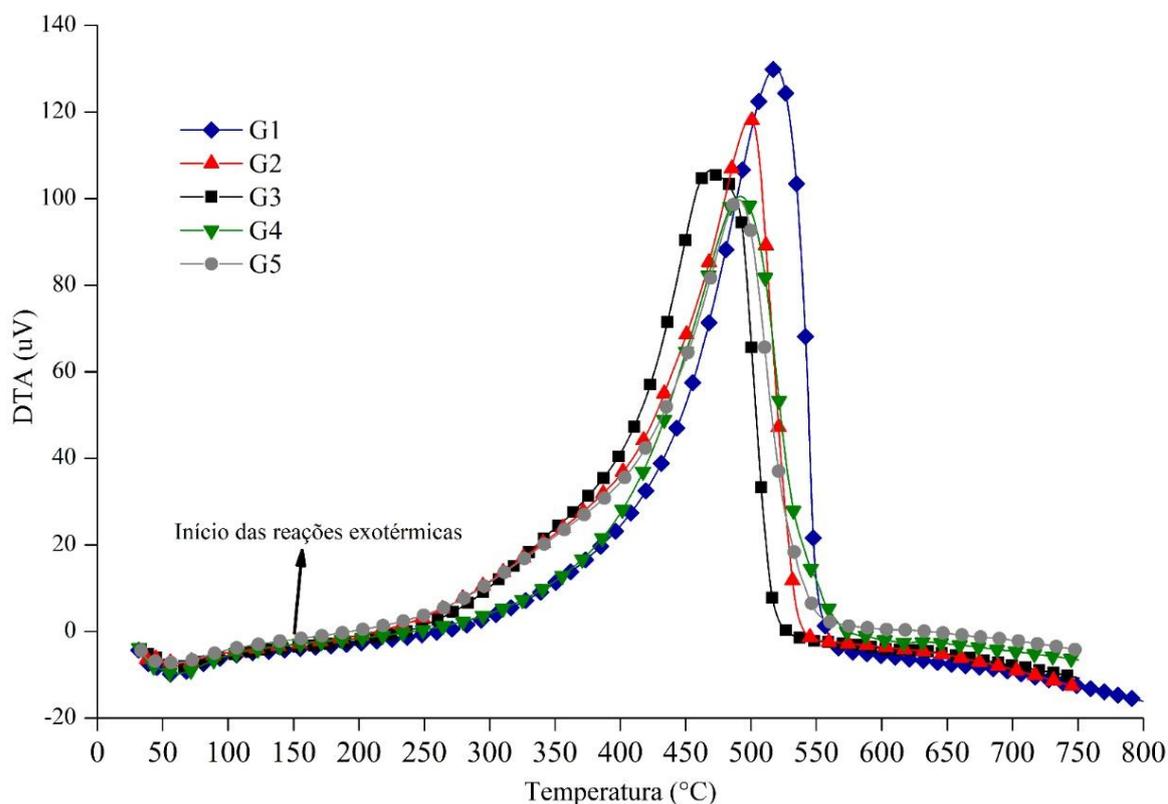
Grupo	Faixa de temperatura (°C)							Massa residual (%)
	25-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	
1	7,42±0,85	1,12±0,83	0,66±0,93	5,51±1,96	38,58±4,10	44,97±2,12	0,16±2,12	1,57
2	5,66±0,15	1,31±0,49	0,44±0,95	7,37±3,06	52,79±6,39	27,90±1,58	0,23±1,58	4,29
3	6,32±0,44	1,50±0,33	0,98±0,32	11,47±0,52	65,80±2,01	12,45±1,41	0,07±1,41	1,41
4	6,18±2,87	3,09±1,09	1,09±0,96	6,87±0,72	48,64±4,31	33,62±1,02	0,17±1,02	0,34
5	6,28±0,50	1,96±0,77	1,10±1,20	8,34±1,54	53,59±4,59	24,33±1,20	0,63±1,20	3,76

Média ± desvio padrão.

O grupo 1, devido apresentar o maior consumo de massa na faixa de temperatura de 500 a 600°C demonstra maior estabilidade térmica, se comparado aos grupos 2, 3, 4 e 5, que apresentaram maior perda de massa em faixa de temperatura mais reduzida (400 – 500°C). Essa fase corresponde a combustão do carbono fixo (MASSUQUE et al., 2021).

Na Figura 23, que demonstra a análise térmica diferencial, percebe-se a ocorrência de duas fases de liberação de energia. A primeira fase ocorre com baixa intensidade no intervalo de temperatura de 300 – 400°C. A segunda fase ocorre em faixa de temperatura mais elevada, entre 400 e 550°C. O grupo 1 apresentou o maior pico de liberação de energia, se comparado aos demais grupos, próximo a 550°C, enquanto o grupo 3 apresentou o maior pico de liberação de energia próximo a 450°C.

Figura 23 – Análise térmica diferencial da combustão dos grupos de carvões vegetais.



Os dados de DTG e DTA demonstram que acima de 150°C as reações se tornam exotérmicas e a maior perda de massa ocorre na mesma faixa de temperatura dos picos de liberação máxima de calor. Massuque et al. (2021) afirmaram que o primeiro pico de liberação de calor está associado à emissão e combustão de materiais voláteis, enquanto no segundo estágio o carbono fixo apresenta combustão de forma mais intensa, liberando mais calor. Devido apresentar maior conteúdo de carbono fixo (65,58%) e poder calorífico superior

(28,9 MJ kg⁻¹), o grupo 1 apresentou maior pico de liberação de energia, acima de 500°C. O menor valor médio do poder calorífico registrado para o grupo 3 (27,4 MJ kg⁻¹) culminou na menor temperatura de máxima liberação de energia.

Os valores médios da temperatura de ignição, temperatura de burnout, temperatura máxima, taxa de combustão máxima, taxa de combustão média e tempo de ignição identificado na curva DTG estão dispostos na Tabela 7. Todos esses parâmetros foram influenciados significativamente pelo fator grupo, conforme o teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Tabela 7 - Parâmetros da combustão dos grupos de carvões vegetais.

Grupo	T _i (°C)	T _b (°C)	T _{máx} (°C)	(dm/dt) _{max} (% min ⁻¹)	(dm/dt) _{média} (% min ⁻¹)	t _{ig} (min)
1	380 ^{±7,79} a	547 ^{±3,15} a	515 ^{±3,49} a	10,57 ^{±0,34} a	1,32 ^{±0,07} b	33 ^{±0,84} a
2	366 ^{±2,09} b	533 ^{±3,89} b	494 ^{±3,81} b	10,58 ^{±0,16} a	1,34 ^{±0,02} b	32 ^{±0,29} b
3	347 ^{±8,49} c	524 ^{±6,76} c	471 ^{±11,09} c	9,72 ^{±0,52} b	1,39 ^{±0,01} a	30 ^{±0,75} c
4	368 ^{±11,30} b	545 ^{±3,46} a	499 ^{±4,18} b	10,38 ^{±0,75} a	1,38 ^{±0,01} a	32 ^{±0,70} b
5	362 ^{±4,91} b	538 ^{±7,69} a	490 ^{±3,59} b	9,54 ^{±0,37} b	1,34 ^{±0,02} b	32 ^{±0,63} b

T_i = temperatura de ignição; T_b = temperatura de burnout; T_{máx} = temperatura máxima; (dm/dt)_{max} = taxa de combustão máxima; (dm/dt)_{média} = taxa de combustão média; t_{ig} = tempo de ignição. Média ± desvio padrão. Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.

Em condições industriais, o grupo 1 permanecerá por mais tempo no reator devido apresentar as maiores médias para a temperatura de ignição (380°C), temperatura de burnout (547°C), temperatura em que ocorre maior perda de massa (515°C) e tempo de ignição (33 min). Biocombustíveis com altas temperaturas finais de combustão apresentam tempo de combustão mais longo. Em ordem, os carvões vegetais dos grupos 3, 5, 2 e 4 apresentam maior facilidade de queima devido aos conteúdos médios elevados de materiais voláteis (37,34%; 35,09%; 28,05%; e 38,15%), conseqüentemente, esses grupos apresentam as menores temperaturas de ignição (LEROY et al., 2006). A literatura demonstra que alto teor de materiais voláteis no combustível favorece sua ignição (PROTÁSIO et al., 2019). Por outro lado, o tempo de queima e a eficiência energética desses carvões é reduzida (GARCÍA et al., 2013). A temperatura máxima de perda de massa do grupo 1 está relacionada ao maior teor de carbono fixo. Os baixos teores de cinzas dos carvões dos grupos 1 e 4 também justificam os maiores valores de temperatura máxima, uma vez que não exerceram papel de catalisadores da combustão, ou seja, não facilitaram a ignição dos carvões desses grupos (MA et al., 2006).

A taxa de combustão máxima foi mais expressiva para os grupos 1 ($10,57 \text{ \% min}^{-1}$) e 2 ($10,58 \text{ \% min}^{-1}$) e pode ser explicada pelos maiores valores de poder calorífico superior reportados para esses grupos, a citar $28,9$ e $28,1 \text{ MJ kg}^{-1}$ (ver Tabela 5), respectivamente. A taxa média de combustão foi maior para os grupos 3 ($1,39 \text{ \% min}^{-1}$) e 4 ($1,38 \text{ \% min}^{-1}$) e pode ser justificada pelos baixos valores de cinzas reportados para esses carvões (grupo 3 = $3,25\%$; grupo 4 = $2,56\%$) (PROTÁSIO et al., 2014).

Não houve efeito significativo de grupo sob os índices de combustão e inflamabilidade (Tabela 8). Por outro lado, o fator grupo influenciou índice de ignição. Os grupos 2, 3 e 4 apresentaram os melhores valores para o índice característico da combustão. Esses grupos também se destacaram quanto aos índices de ignição e de inflamabilidade. Em resumo, os grupos mencionados apresentam melhor reatividade à combustão, inflamabilidade e facilidade de ignição. Biocombustíveis com maior índice de ignição apresentam maior facilidade de inflamar (FARROW, 2013).

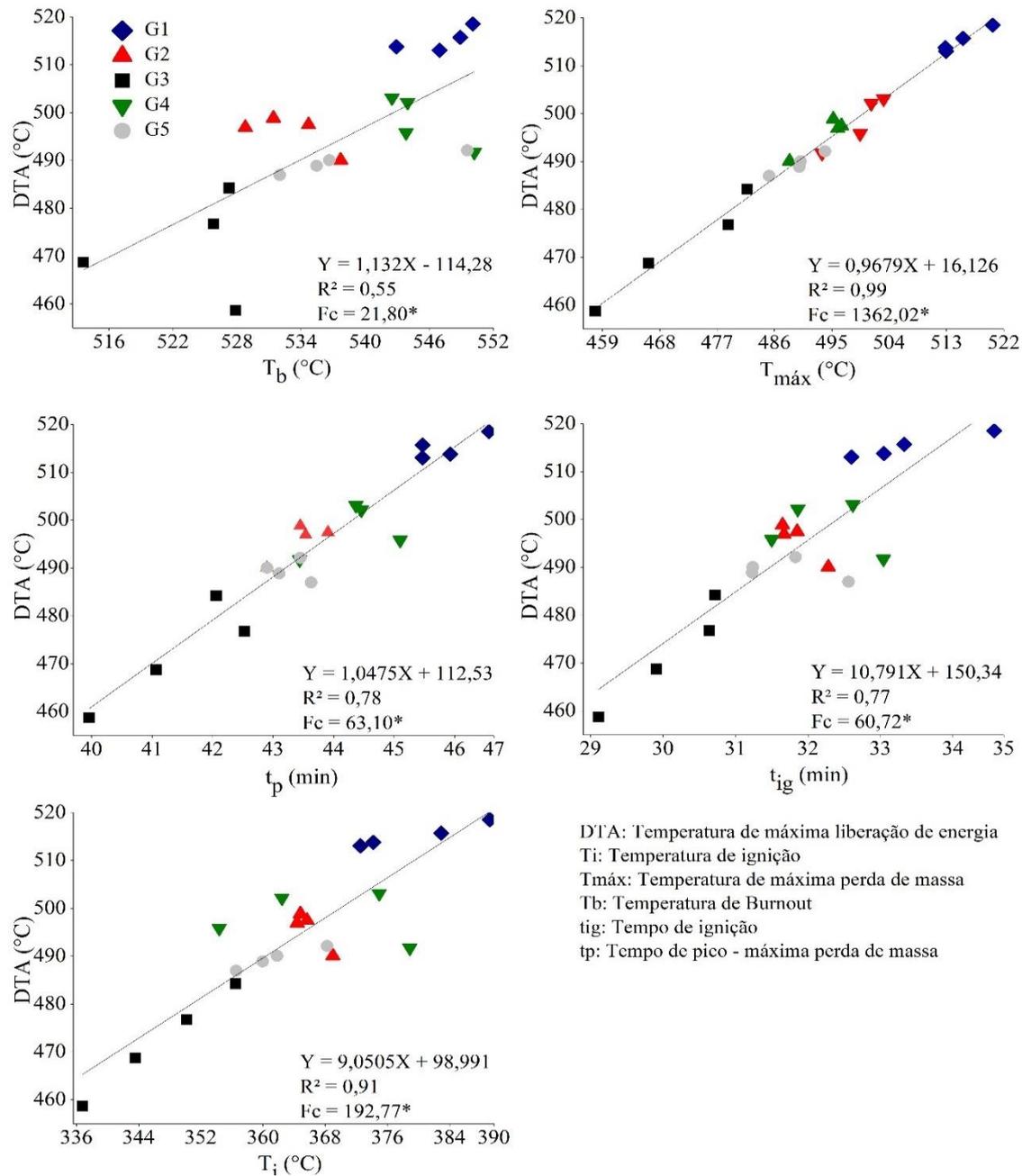
Tabela 8 - Índices da combustão dos grupos de carvões vegetais.

Grupo	$S \times 10^7 \text{ \%}^2 / (\text{min}^2 \text{ °C}^3)$	$Ci \times 10^4 \text{ \% min}^{-1} / \text{°C}^2$	$Di \times 10^3 \text{ (\% min}^{-3})$
1	$1,78^{\pm 0,18}$ a	$0,73^{\pm 0,04}$ a	$6,91^{\pm 0,39}$ b
2	$1,99^{\pm 0,07}$ a	$0,79^{\pm 0,02}$ a	$7,64^{\pm 0,16}$ a
3	$2,14^{\pm 0,18}$ a	$0,81^{\pm 0,06}$ a	$7,82^{\pm 0,68}$ a
4	$1,96^{\pm 0,22}$ a	$0,77^{\pm 0,09}$ a	$7,26^{\pm 0,53}$ b
5	$1,81^{\pm 0,14}$ a	$0,73^{\pm 0,05}$ a	$6,95^{\pm 0,31}$ b

S = índice de combustão; Ci = índice de inflamabilidade; Di = índice de ignição. Média \pm desvio padrão. Letras diferentes na coluna indicam diferença significativa ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.

Nesse estudo, relações positivas foram verificadas entre a temperatura máxima de liberação de energia ($T_{\text{máxDTA}}$), temperatura de burnout (T_b), temperatura de máxima perda de massa ($T_{\text{máxTGA}}$), tempo de pico – máxima perda de massa (t_p), temperatura de ignição (T_i) e tempo de ignição (t_{ig}) (Figura 24). Como os grupo 1 (515°C), 4 (499°C), 2 (494°C) e 5 (490°C) apresentaram as maiores temperaturas de máxima liberação de energia (ver Tabela 7), conseqüentemente, obtiveram os maiores valores para temperatura final de combustão (temperatura de burnout), temperatura de máxima perda de massa, o tempo em que ocorre a maior perda de massa, temperatura de ignição e o tempo de ignição. Vale mencionar que o grupo 3 apresentou a menor temperatura média de máxima liberação de energia (471°C).

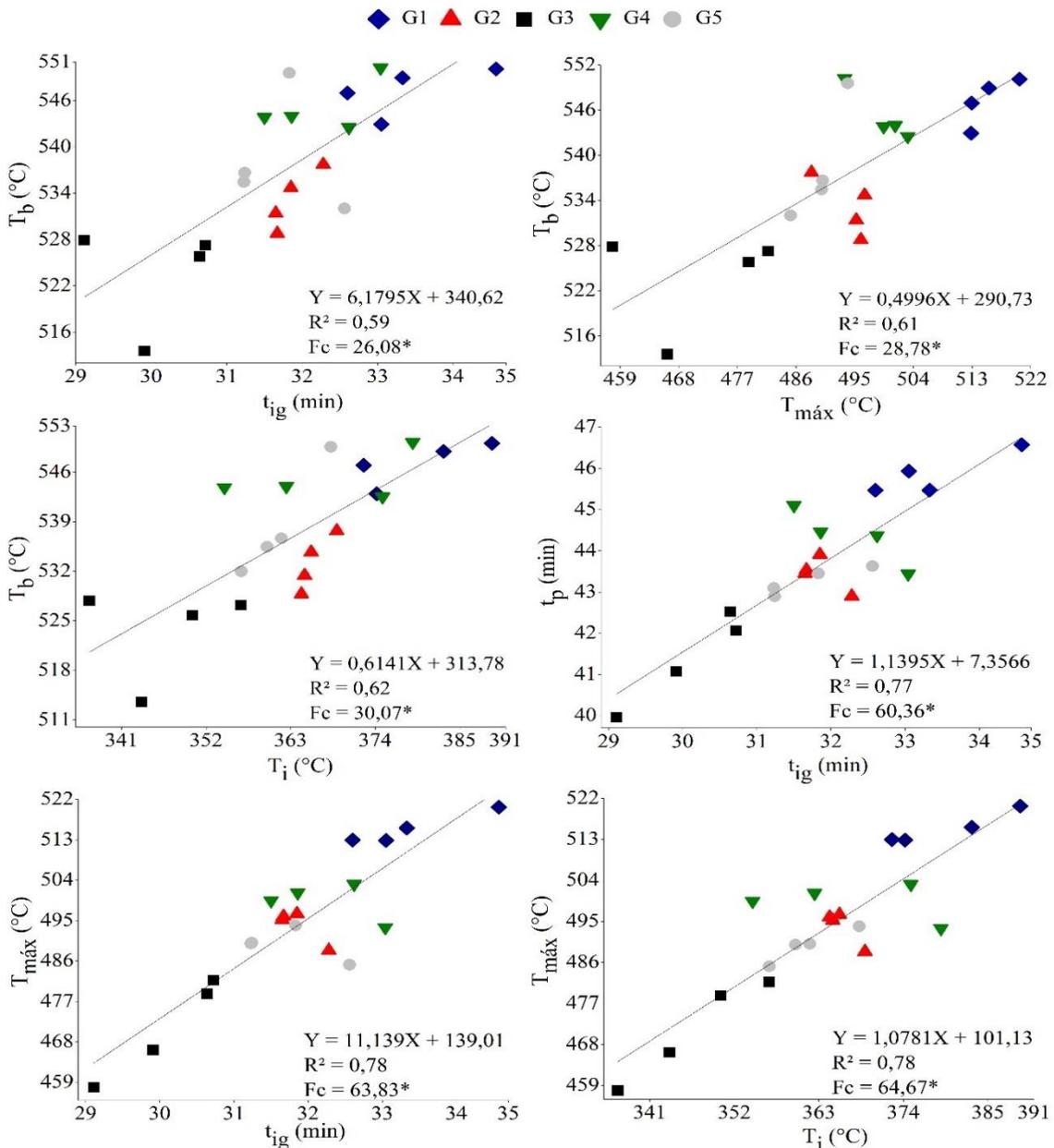
Figura 24 – Relações entre a temperatura de máxima liberação de energia na curva DTA ($T_{\text{máxDTA}}$) e temperatura de burnout (T_b), temperatura de máxima perda de massa obtida na curva TGA ($T_{\text{máxTGA}}$), tempo de pico – máxima perda de massa (t_p), temperatura de ignição (T_i) e tempo de ignição (t_{ig}).



O presente estudo demonstrou que o tempo de ignição tem relação positiva com a temperatura de burnout, tempo correspondente à máxima taxa de combustão e temperatura de máxima perda de massa. A temperatura de ignição apresenta relação direta com a temperatura de burnout e temperatura de máxima perda de massa. A temperatura de burnout se relaciona positivamente com a temperatura de máxima perda de massa (Figura 25). Devido aos grupos 1 e 4 apresentarem os maiores valores para tempo de ignição, temperatura de ignição e

temperatura de burnout, se destacaram com os melhores índices de máxima taxa de combustão e temperatura de máxima perda de massa.

Figura 25 – Relações entre as variáveis da combustão de carvões vegetais de grupos de espécies nativas da Amazônia. T_b - temperatura de Burnout; $T_{máx}$ - temperatura de máxima perda de massa; t_p - tempo de pico – máxima perda de massa; T_i - temperatura de ignição; e t_{ig} - tempo de ignição.

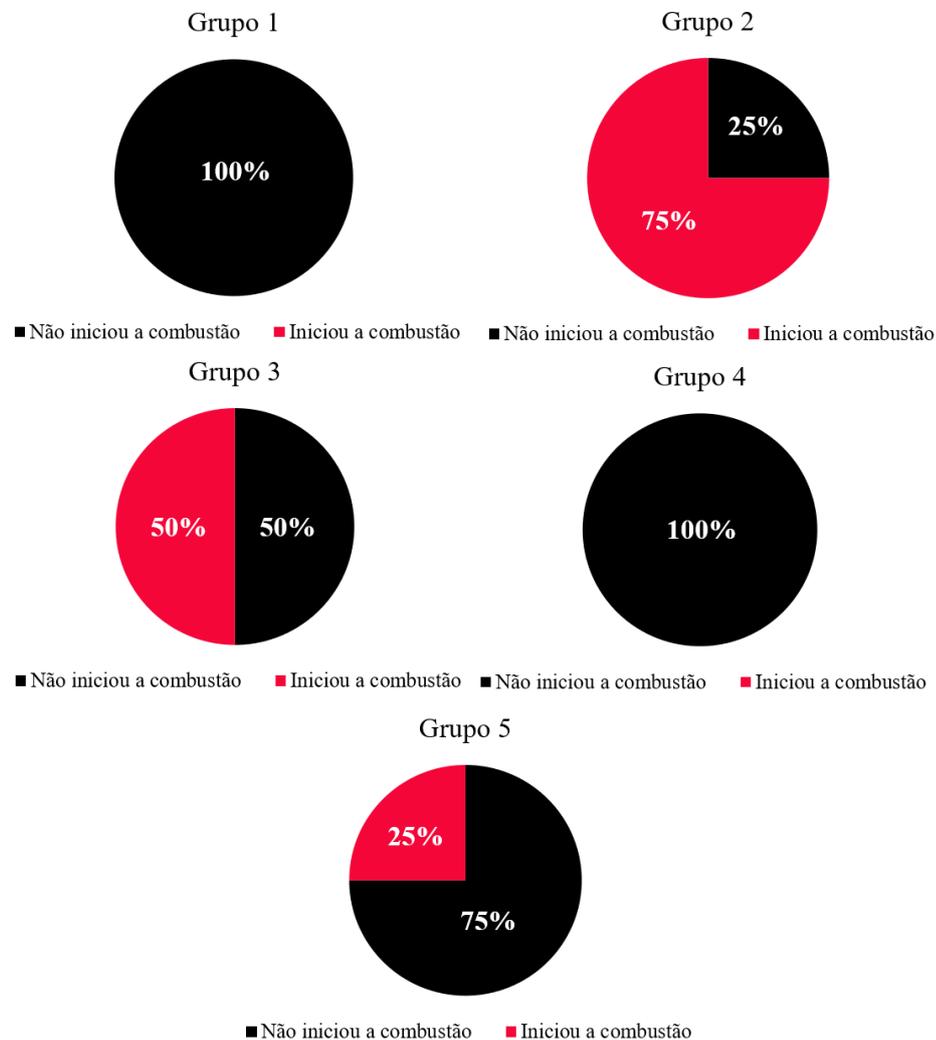


6.3.2 Autocombustão do carvão vegetal

Com base nos resultados da análise de combustão espontânea, os carvões vegetais dos grupos 1 e 4 não apresentaram amostras com incidência de auto combustão (Figura 26). Por

outro lado, cerca de 75, 50 e 25% das amostras de carvão dos grupos 2, 3 e 5, respectivamente, entraram em combustão.

Figura 26 - Análise da combustão espontânea de carvões vegetais de grupos de espécies carbonizadas em fornos de alvenaria.

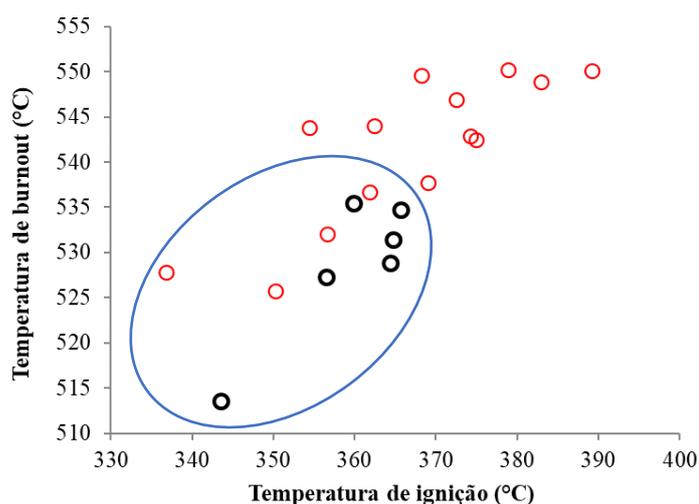


Os carvões dos grupos 1 e 4, por não apresentarem combustão espontânea podem ser transportados sem riscos de segurança, enquanto os carvões dos grupos 2, 3 e 5 se enquadram na classe 2 da resolução 420 da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2004). Essa resolução dispõe que a classe 2 representa produtos com risco de sofrer combustão espontânea. Os grupos 2 e 3 foram produzidos com madeiras segregadas e, mesmo assim, sofreram combustão espontânea. Esses resultados permitem afirmar que não adianta segregar madeiras em condições operacionais se não há controle de processo (temperatura) ou de outras variáveis associadas a matéria-prima (ex.: secagem). Com a segregação e maior

controle da carbonização, os incidentes associados à combustão do carvão podem ser reduzidos, melhorando o transporte nas rodovias do Brasil.

Nesse estudo, os carvões que sofreram autocombustão também apresentaram baixas temperaturas de ignição e de burnout (Figura 27). Até a temperatura de ignição de 362°C, 6 amostras de um total de 10 (circuladas em azul na Figura 27) sofreram combustão espontânea (60%).

Figura 27 – Temperaturas de burnout e ignição dos carvões vegetais. Círculos pretos indicam os carvões que entraram em combustão espontânea e os círculos em vermelho representam os carvões que não entraram em combustão espontânea.



Considerando os carvões vegetais dos grupos 3 e 5, as baixas temperaturas de ignição estão relacionadas aos conteúdos elevados de materiais voláteis e cinzas. Quanto ao grupo 2, acredita-se que o efeito foi mais pronunciado pela quantidade e qualidade das cinzas. Os carvões vegetais dos grupos 2 (6,03%), 3 (3,25%) e 5 (3,60%) apresentaram os maiores percentuais de cinzas (ver Tabela 4), o que pode justificar a ocorrência de autocombustão. Massuque et al. (2021) reportaram que possivelmente na composição química das cinzas há elementos inorgânicos que podem servir como catalisadores, facilitando a ignição do carvão vegetal. Carvões minerais (coque) com óxidos minerais do tipo CuO, Fe₂O₃ e ZnO contribuem para a redução da temperatura de ignição em 50, 8,4 e 19,2°C, respectivamente (COAL et al., 2007). Portanto, é necessário a qualificação das cinzas dos carvões vegetais de resíduos madeireiros visando testar a hipótese anteriormente mencionada. Além disso, as análises de qualidade de cinza podem auxiliar em protocolos de transporte desses carvões, pois possivelmente reduzem a temperatura de combustão espontânea desse insumo.

Como recomendação, destaca-se a necessidade de resfriar adequadamente os fornos de alvenaria após a carbonização, controlar a temperatura do carvão visando ao transporte e utilizar mantas térmicas nos caminhões para amenizar o efeito da radiação solar sob a carga de carvão, que é elevado na região Norte do país. As indústrias produtoras de carvão vegetal devem investir em pesquisa e tecnologia para melhoria do processo de carbonização em fornos de alvenaria do tipo rabo-quente, principalmente no controle da temperatura.

6.4 Conclusões

O presente estudo revelou que a segregação de madeiras residuais do manejo florestal sustentável afetou os índices de combustibilidade e a autocombustão do carvão vegetal.

O carvão vegetal do grupo 1 é mais estável termicamente devido ao menor teor de cinzas e maior teor de carbono fixo e poder calorífico superior.

O grupo 5, representando a carbonização tradicional sem segregação, produziu carvões com baixa temperatura de ignição e baixa taxa de combustão máxima.

Os carvões dos grupos 1 e 4 não apresentam riscos de combustão espontânea, enquanto os carvões dos grupos 2, 3 e 5 se adequaram a classe 2 da resolução 420 da Agência Nacional de Transportes Terrestres.

O efeito da segregação de madeiras residuais na combustão espontânea do carvão vegetal pode ter sido menos pronunciado devido ao controle empírico do processo de carbonização.

Referências

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica. **NBR 6923**: carvão vegetal: amostragem e preparação da amostra. Rio de Janeiro: ABNT, 1981, 15p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8112**: Análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro: 8 p. 1986.
- ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Resolução ANTT N° 420/02/2004**. ANTT. Disponível em: http://ftp.antt.gov.br/acpublicas/apublica2003-08/APublica2003-08_04.pdf Acesso em: 28 set 2021.
- ARAUZO, P. J.; ATIENZA-MARTÍNEZ, M.; ÁBREGO, J.; OLSZEWSKI, M. P.; CAO, Z.; KRUSE, A. Combustion characteristics of hydrochar and pyrochar derived from digested sewage sludge. **Energies**, v. 13, p. 1–15, 2020.

- BATISTELLA, L.; AVIZ, A.; NOGUEIRA, M. F. M.; PIRES, A. A.C.; ROUSSET, P. **Influência da umidade relativa no auto-aquecimento do carvão vegetal**. In: fórum nacional sobre carvão vegetal. Belo Horizonte, 2016, p. 1-5.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União, Brasil, 2012.
- COAL, A.; LI, X. G.; MA, B. G.; XU, L.; LUO, Z. T.; WANG, K. Catalytic effect of metallic oxides on combustion behavior of high ash coal. **Energy Fuels**, v. 113, p. 2669–2672, 2007.
- CORDERO, T.; MARQUEZ, F.; RODRIGUEZ-MIRASOL, J.; RODRIGUEZ, J. J. Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. **Fuel**, v. 80, p. 1567–1571, 2001.
- COSTA, J. S.; SILVA, M. G.; SCATOLINO, M. V.; LIMA, M. D. R.; ASSIS, M. R.; BUFALINO, L.; NUMAZAWA, S.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Relating features and combustion behavior of biomasses from the Amazonian agroforestry chain. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2020.
- CRUZ FILHO, D.; SILVA, J. N. M. Evaluation of the amount of coarse woody debris in area of logged and undisturbed forests, using line-intercept sampling, in the Medium Moju River, Eastern Amazonia, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 39, p. 527–532, 2009.
- DIAS, E. C.; ASSUNÇÃO, A. A.; GUERRA, C. B.; PRAIS, H. A. C. Processo de trabalho e saúde dos trabalhadores na produção artesanal de carvão vegetal em Minas Gerais, Brasil. **Caderno de Saúde Pública**, v. 18, n. 1, p. 269-277, 2002.
- FARROW, T. S. **A fundamental study of biomass oxy-fuel combustion and co-combustion**. Nottingham: University of Nottingham, 2013.
- GARCÍA, R. et al. Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresource Technology**, v. 139, p. 1–4, 2013.
- IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2019**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2019.pdf>. Acesso em: 22 out. 2020.
- IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2020**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.
- JANKOVIĆ, B.; MANIĆ, N.; RADOVIĆ, I.; JANKOVIĆ, M.; RAJAČIĆ, M. Model-free and model-based kinetics of the combustion process of low rank coals with high ash contents using TGA-DTG-DTA-MS and FTIR techniques. **Thermochimica Acta**, v. 679, p. 178337, 2019.

- KELLER, M.; PALACE, M.; ASNER, G. P.; PEREIRA Jr, R.; SILVA, J. N. M. Coarse woody debris in undisturbed and logged forests in the eastern Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, p. 784–795, 2004.
- LEROY, V.; CANCELLIERI, D.; LEONI, E. Thermal degradation of ligno-cellulosic fuels: DSC and TGA studies. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 451, n. 1/2, p. 131-138, 2006.
- LIMA, M. D. R. **A segregação de resíduos do manejo florestal sustentável para otimização da produção bioenergética na Amazônia Brasileira**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, 205p. 2020.
- LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JÚNIOR, U. O.; ASSIS, M. R.; XAVIER, C. N.; BUFALINO, L.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass and Bioenergy**, v. 140, p. 105660, 2020a.
- LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JÚNIOR, U. O.; SILVA, R. C. C.; BUFALINO, L.; NUMAZAWA, S.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. **Renewable Energy**, v. 163, p. 792-806, 2021.
- LIMA, M. D. R.; SIMETTI, R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O.; BUFALINO, L.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. **Biomass and Bioenergy**, n. 142, p. e105804, 2020b.
- MA, B.; LI, X.; XU, L.; WANG, K.; WANG, X. Investigation on catalyzed combustion of high ash coal by thermogravimetric analysis. **Thermochimica Acta**, v. 445, p. 19–22, 2006.
- ONU – Organização das Nações Unidas. **Recommendations on the transport of dangerous goods: manual of tests and criteria**. 5 ed. United Nations Publications: New York and Geneva, 2009.
- 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, 2005, 27p.
- IDRIS, S. S.; RAHMAN, N. A.; ISMAIL, K. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA). **Bioresource Technology**, v. 123, p. 581-591, 2012.

- KLUSKA, J.; OCHNIO, M.; KARDAŚ, D. Carbonization of corncobs for the preparation of barbecue charcoal and combustion characteristics of corncob char. *Waste Management*, v. 105, p. 560-565, 2020.
- MARINOV, S. P.; GONSALVES, L.; STEFANOVA, M.; YPERMAN, J.; CARLEER, R.; REGGERS, G.; YÜRÜM, Y.; GROUDEVA, V.; GADJANOV, P. Combustion behaviour of some biodesulphurized coals assessed by TGA/DTA. *Thermochimica Acta*, v. 497, n. 1–2, p. 46-51, 2010.
- MASSUQUE, J.; MATAVEL, C. E.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Combustion performance of charcoal: a comparative study on Miombo woodland native species and *Eucalyptus grandis*. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2021.
- MOON, C.; SUNG, Y.; AHN, S.; KIM, T.; CHOI, G.; KIM, D. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 47, p. 232–240, 2013.
- NUMAZAWA, C. T. D.; NUMAZAWA, S.; PACCA, S.; JOHN, V. M. Logging residues and CO₂ of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 122, p. 280–285, 2017.
- PARÁ, Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Instrução Normativa 05, de 10 de setembro de 2015**. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Plano de Manejo Florestal Sustentável –PMFS nas florestas. Diário Oficial do Estado, Brasil, 2015.
- PEREIRA, A. A.; LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; NUMAZAWA, S.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO, T. P. Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, p. e3157, 2020.
- PROTÁSIO, T.P.; SCATOLINO, M. V.; ARAÚJO, A. C. C.; OLIVEIRA, A. F. C. F.; FIGUEIREDO, I. C. R.; ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior *Eucalyptus* freewood. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 626–641, 2019.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; MIRMEHDI, S.; SILVA, M. G. Quality and energetic evaluation of the charcoal made of babassu nut residues used in the steel industry. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, n.5, p.435-444, 2014.
- PROTÁSIO, T. D. P.; GUIMARÃES JUNIOR, M.; SEYEDMOHAMMAD MIRMEHDI, S.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; KNOVACK, K. M. Combustion of biomass and charcoal made from babassu nutshell. **Cerne**, v. 23, n. 1, p. 1-9, 2017.

R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

SHEN, G.-D.; WANG, Z.-Q.; WU, J.-L.; HE, T.; LI, J.-Q.; YANG, J.; WU, J.-H. Combustion characteristics of low-rank coal chars in O₂/CO₂, O₂/N₂ and O₂/Ar by TGA. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, v. 44, n. 9, p. 1066-1073, 2016.

SOARES, V. C. **Comportamento térmico, químico e físico da madeira e do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes idades**. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras. Lavras, 108p. 2011.

WANG, C. A.; LIU, Y.; ZHANG, X.; CHE, D. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in northwestern China. **Energy Fuels**, v. 25, p. 3634–3645, 2011.

KLUSKA, J.; OCHNIO, M.; KARDAŚ, D. Carbonization of corncobs for the preparation of barbecue charcoal and combustion characteristics of corncob char. *Waste Management*, v. 105, p. 560-565, 2020.

XIONG, S.; ZHANG, S.; WU, Q.; GUO, X.; DONG, A.; CHEN, C. Investigation on cotton stalk and bamboo sawdust carbonization for barbecue charcoal preparation. **Bioresource Technology**, v. 152, p. 86–92, 2014.

ZOU, H.; EVRENDILEK, F.; LIU, J.; BUYUKADA, M. Combustion behaviors of pileus and stipe parts of *Lentinus edodes* using thermogravimetric-mass spectrometry and Fourier transform infrared spectroscopy analyses: thermal conversion, kinetic, thermodynamic, gas emission and optimization analyses. **Bioresource Technology**, v. 288, p. 121481, 2019.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia de segregação de resíduos madeireiros do manejo florestal no pátio de estocagem das carvoarias se mostrou promissora para a produção de carvão vegetal na Amazônia.

O estudo revelou que a segregação de madeiras residuais culminou na elevação da qualidade do carvão vegetal produzido nos fornos de alvenaria, especialmente quanto a densidade relativa aparente, friabilidade, teor de cinzas, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e densidade energética. Em contraste, a carbonização convencional se mostrou muito variável, com carvões mais friáveis e menos resistentes.

Carvões segregados apresentaram as melhores temperaturas de ignição, temperaturas de burnout, temperaturas em que ocorre maior perda de massa e tempos de ignição. Já os carvões oriundos da carbonização tradicional, apresentaram baixa temperatura de ignição e baixa taxa de combustão máxima.

Dois grupos de carvões não apresentaram autocombustão, o que demonstra que a segregação pode reduzir a incidência de combustão espontânea do carvão vegetal. Por outro lado, os carvões tradicionais entraram em autocombustão. Além da segregação da matéria-prima, recomenda-se resfriar adequadamente os fornos de alvenaria após a carbonização, controlar a temperatura do carvão visando ao transporte e utilizar mantas térmicas nos caminhões para amenizar o efeito da radiação solar sob a carga de carvão.

Os novos estudos devem abordar a viabilidade econômica da segregação de madeiras residuais nas unidades produtoras de carvão vegetal na Amazônia Brasileira. Vale destacar que a melhoria da qualidade do carvão e os custos operacionais associados a etapa de segregação devem ser considerados no preço do produto a ser comercializado. Estudo da composição química das cinzas pode ajudar a responder a autocombustão do carvão vegetal. Ampliar os estudos de caracterização e agrupamento de madeiras residuais do manejo florestal sustentável, visando a melhoria da qualidade do carvão vegetal destinado ao Polo Siderúrgico de Carajás, situado nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Além do aumento do número de espécies nos estudos futuros, recomenda-se maior controle dos diâmetros dos toretes a serem carbonizados, pois acredita-se que tenha influenciado negativamente a friabilidade dos carvões vegetais e disfarçado o efeito da segregação na qualidade do carvão vegetal. Assim, carbonizações de resíduos com diâmetros e comprimentos semelhantes devem ser priorizadas nos próximos estudos.

A combustibilidade e combustão espontânea dos carvões vegetais de resíduos madeireiros da Amazônia de 23 espécies tropicais, segregados e não segregados (modelo

tradicional de carbonização), produzidos em fornos de alvenaria foram avaliadas nesse estudo. Novas abordagens devem incluir resíduos madeireiros de mais espécies tropicais manejadas na Amazônia, ampliando o conhecimento da matéria prima que pode subsidiar o Polo Siderúrgico de Carajás, situado nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Recomenda-se maior controle do processo de carbonização em fornos de alvenaria, pois acredita-se que o controle empírico baseado na experiência do carbonizador tenha influenciado negativamente a combustão espontânea dos carvões vegetais e mascarado o efeito positivo da segregação. Carvões produzidos com matéria prima homogênea em um processo controlado de forma adequada são requeridos pelas siderúrgicas, dada a influência positiva na produção e qualidade de ferro gusa.