



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

DENES DE SOUZA BARROS

**COMPREENDENDO OS EFEITOS DA SEGREGAÇÃO DE MADEIRAS RESIDUAIS
DA AMAZÔNIA BRASILEIRA SOB A QUALIDADE E COMBUSTIBILIDADE DO
CARVÃO VEGETAL**

**BELÉM
2021**

DENES DE SOUZA BARROS

**COMPREENDENDO OS EFEITOS DA SEGREGAÇÃO DE MADEIRAS RESIDUAIS
DA AMAZÔNIA BRASILEIRA SOB A QUALIDADE E COMBUSTIBILIDADE DO
CARVÃO VEGETAL**

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

**COMPREENDENDO OS EFEITOS DA SEGREGAÇÃO DE MADEIRAS RESIDUAIS
DA AMAZÔNIA BRASILEIRA SOB A QUALIDADE E COMBUSTIBILIDADE DO
CARVÃO VEGETAL**

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:

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

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

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

Dr. Mario Vanoli Scatolino– 3º Examinador
Universidade Federal de Lavras - UFLA

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

AGRADECIMENTOS

RESUMO GERAL

Embora os resíduos madeireiros oriundos do manejo florestal sustentável sejam alternativas promissoras para a produção de carvão vegetal na Amazônia Brasileira, porém devido a diversidade de espécies que compõem essa biomassa, o carvão derivado apresenta qualidade heterogênea. A segregação das madeiras já se mostrou uma alternativa importante para o aumento da produtividade e rendimento em carvão vegetal na carvoaria, pois promove a homogeneização da matéria prima enfornada. Este estudo visa estudar o efeito da segregação dos resíduos madeireiros na qualidade, combustibilidade e ocorrência da autocombustão em carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria no Estado do Pará. 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. O índice característico da combustão, índice de ignição e o índice de inflamabilidade também foram determinados. 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 galhos 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 ($21,3 \text{ MJ m}^{-3}$). Porém, a carbonização convencional se mostrou muito variável, gerando carvões mais friáveis e menos resistentes. Dois grupos de carvões não apresentaram autocombustão (1 e 4), demonstrando que a segregação pode reduzir a incidência de combustão espontânea do carvão vegetal. Por outro lado, os carvões tradicionais entraram em autocombustão. Os grupos 1, 2 e 4 apresentaram as maiores temperaturas de ignição ($379,72^{\circ}\text{C}$, $365,98^{\circ}\text{C}$ e $367,67^{\circ}\text{C}$), temperaturas de burnout ($547,23^{\circ}\text{C}$, $533,15^{\circ}\text{C}$ e $545,15^{\circ}\text{C}$), temperaturas em que ocorre maior perda de massa ($515,43^{\circ}\text{C}$, $494,02^{\circ}\text{C}$ e $499,32^{\circ}\text{C}$) e tempos de ignição (33,39 min, 31,86 min e 32,26 min). O grupo 5 produziu carvões com baixa temperatura de ignição ($361,65^{\circ}\text{C}$) e baixa taxa máxima de combustão ($9,54 \text{ \% min}^{-1}$). Portanto, a segregação das madeiras residuais promoveu resultados positivos quanto à 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. 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 branches of the *D. excelsa* species, presented the best values for bulk density (0.737 g cm^{-3}), ash content (1.20%), 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. 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, traditional charcoals showed samples with spontaneous combustion. Groups 1, 2, and 4 had the highest ignition temperatures (379.72°C , 365.98°C , and 367.67°C), burnout temperatures (547.23°C , 533.15°C , and 545.15°C), temperatures at which the greatest loss of mass occurs (515.43°C , 494.02°C , and 499.32°C) and ignition times (33.39 min, 31.86 min, and 32, 26 min). Group 5 produced charcoals with low ignition temperature (361.65°C) and low maximum combustion rate ($9.54 \text{ \% min}^{-1}$). 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”	15
Figura 2 -	Forno de carbonização do tipo "forno de encosta".....	16
Figura 3 -	Forno de carbonização do tipo "forno de superfície".....	17
Figura 4 -	Forno de carbonização do tipo "forno retangular".....	18
Figura 5 -	Forno de carbonização do tipo “MF1-UFV”, vista geral.....	19
Figura 6 -	Sistema forno fornalha.....	20
Figura 7 -	Manual de Ensaio e Critérios de Recomendação sobre o Transporte de Mercadorias Perigosas.....	27

Capítulo 1

Figura 8 -	Localização da unidade de produção de carvão vegetal da Fazenda Rio Capim, localizada na cidade de Paragominas, Estado do Pará.....	39
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.....	40
Figura 10 -	Grupos de espécies segregados para a carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará, Brasil.....	42
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.....	43
Figura 12 -	Amostras de carvão utilizadas (A) e tambor rotatório elétrico utilizado no teste (B).....	44
Figura 13 -	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.....	46

Figura 14 -	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.....	47
Figura 15 -	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.....	49
Figura 16 -	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.....	50
Figura 17 -	Friabilidade dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D) e 5 (E) por forno de alvenaria.....	52
Figura 18 -	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.....	53
Figura 19 -	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.	54

Capítulo 2

Figura 20 -	Localização da carvoaria da Fazenda Rio Capim, localizada na cidade de Paragominas, Estado do Pará.....	62
Figura 21 -	Grupos de espécies para a carbonização na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, Paragominas, Pará.....	63
Figura 22 -	Curvas termogravimétricas dos carvões de grupos de espécies produzidos em fornos de alvenaria.....	69
Figura 23 -	Curva DTG dos carvões vegetais de grupos de espécies produzidos em fornos de alvenaria.....	70

Figura 24 -	Análise térmica diferencial da combustão dos grupos de carvões vegetais.....	72
Figura 25 -	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}).....	75
Figura 26 -	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.....	77
Figura 27 -	Análise da combustão espontanea de carvões vegetais de grupos de espécies carbonizadas em fornos de alvenaria.....	78
Figura 28 -	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.....	79

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.....	41
Tabela 2 -	Classificação da friabilidade do carvão vegetal.....	45

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.....	64
Tabela 4 -	Análise química imediata dos carvões vegetais de madeiras residuais segregadas em grupos de espécies.....	68
Tabela 5 -	Perda de massa dos carvões vegetais em porcentagem por faixas de temperaturas durante o processo de combustão.....	71
Tabela 6 -	Parâmetros da combustão dos grupos de carvões vegetais.....	73
Tabela 7 -	Índices da combustão dos grupos de carvões vegetais.....	74

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.....	13
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	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 superfície.....	16
4.2.4	Forno retangular.....	17
4.2.5	Forno MF1-UFV.....	18
4.2.6	Forno acoplado a fornalha.....	19
4.2.7	Fornos metálicos.....	20
4.3	Processo de carbonização.....	21
4.4	Potencial dos resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável para produção de carvão vegetal.....	21
4.5	Propriedades do carvão vegetal destinados ao uso doméstico e industrial.....	23
4.6	Estudo da combustibilidade e combustão espontânea do carvão vegetal.....	25

	REFERÊNCIAS.....	27
5	CAPÍTULO 1 – QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO POR MEIO DA SEGREGAÇÃO DOS RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	36
5.1	Introdução.....	37
5.2	Material e Métodos.....	38
5.2.1	Origem do material biológico.....	38
5.2.2	Segregação dos resíduos madeireiros para produção de carvão vegetal...	39
5.2.3	Amostragem dos carvões vegetais produzidos nos fornos de alvenaria....	42
5.2.4	Qualidade do carvão vegetal.....	43
5.2.5	Análises estatísticas.....	45
5.3	Resultados e Discussão.....	46
5.3.1	Efeito da segregação na densidade relativa aparente do carvão vegetal....	46
5.3.2	Efeito da segregação na friabilidade do carvão vegetal.....	49
5.3.3	Efeito da segregação na constituição química imediata do carvão vegetal.....	52
5.3.4	Efeito da segregação nas propriedades energéticas do carvão vegetal.....	54
5.4	Conclusão.....	55
	Referências.....	55
6	CAPÍTULO 2 – COMBUSTIBILIDADE DOS CARVÕES VEGETAIS PRODUZIDOS A PARTIR DA SEGREGAÇÃO DOS RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	59
6.1	Introdução.....	60
6.2	Material e Métodos.....	61
6.2.1	Origem do carvão vegetal.....	61
6.2.2	Segregação das madeiras residuais para carbonização nos fornos de alvenaria.....	62
6.2.3	Amostragem do carvão vegetal.....	65
6.2.4	Qualidade do carvão vegetal.....	65
6.2.5	Análises térmicas dos carvões.....	65
6.2.6	Teste de não combustão espontânea dos carvões.....	67

6.2.7	Análises estatísticas.....	67
6.3	Resultados e Discussão.....	67
6.3.1	Qualidade do carvão vegetal dos resíduos de espécies tropicais.....	67
6.3.2	Perfil térmico dos carvões vegetais.....	69
6.3.3	Autocombustão do carvão vegetal.....	78
6.4	Conclusão.....	80
	Referências.....	80
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83

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 caminha junto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) lançados 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 o 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*. Segundo o relatório IBÁ (2020), o Pará apresenta 154.402 hectares de florestas plantadas de *Eucalyptus*. Dada a insuficiência de matéria prima **plantada** 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.

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. A heterogeneidade desses resíduos também está relacionada a sua origem, pois são **compostos** por 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. Por outro lado, empresários 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.

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 a 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 presente tese está dividida em dois capítulos. O primeiro aborda os efeitos da segregação da biomassa residual do manejo florestal sustentável, em condições industriais, na 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

Compreender os efeitos da segregação da matéria prima oriunda do manejo florestal sustentável sobre a qualidade, combustibilidade e ocorrência de autocombustão dos carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria do tipo rabo quente na Amazônia Brasileira.

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 a utilização de matéria prima mais similar.

Objetivo: Comparar as propriedades dos carvões vegetais produzidos com madeiras residuais segregadas e não segregadas.

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: O agrupamento de espécies favorece a melhor performance de combustibilidade e redução de autocombustão do carvão vegetal.

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

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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. Nesse segmento, 18,2% (2,9 milhões de tep) da energia empregada é oriunda de carvão vegetal, enquanto 42,7% são advindas do coque (6,8 milhões de tep) (FAO, 2017; 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, 2008).

No Brasil, a maior parte dos polos produtores de carvão vegetal não contam com metodologias modernas de carbonização, tampouco com controle de qualidade da produção. Essas falhas são causadas sobretudo, 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 decomposição térmica da biomassa (CARVALHO et al., 2012; DONATO et al., 2015; 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 tipo de controle do processo. Nesse modelo de carbonização, a produção do carvão é baseada unicamente na experiência do carbonizador (FAO, 2017; RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

Estima-se que 80% da produção brasileira de carvão vegetal ainda são realizadas em fornos rudimentares. Devido ao nível tecnológico, esses fornos apresentam baixo rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Os fornos de alvenaria são exemplos de sistemas rudimentares de produção, 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 desses fornos e reduzir possíveis ocorrência de fissuras (CARNEIRO et al., 2013; GOMES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2013). A escolha desses fornos é justificada pelo menor custo relacionado a construção e manutenção, uma vez que apresenta arquitetura

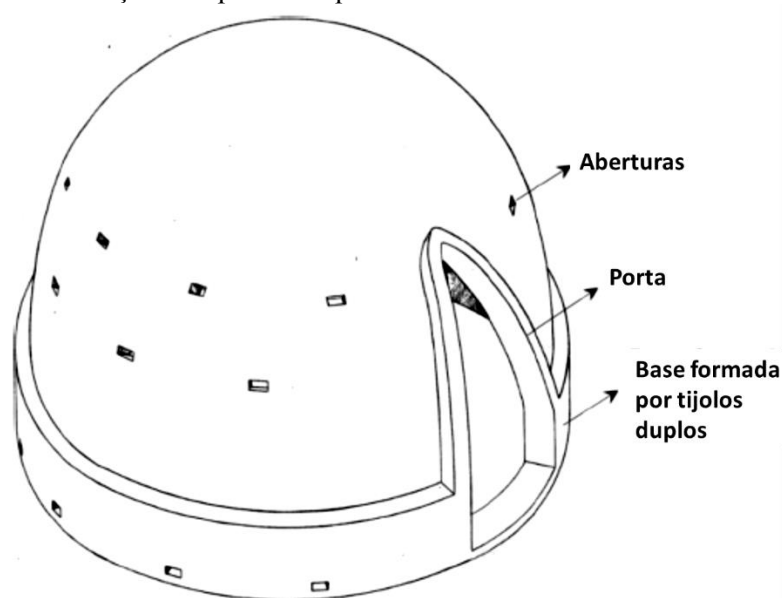
simples. O conhecimento sobre o formato do forno e suas dimensões são essenciais, pois interferem diretamente no rendimento e no período de carbonização, necessitando sempre de operadores experientes (OLIVEIRA et al., 2017).

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 também pequenas aberturas que servem para o controle da entrada de oxigênio, permitindo ainda a saída de gases e vapores oriundos do processo de carbonização. A presença de chaminé é dispensada (KATO et al., 2005). 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”.

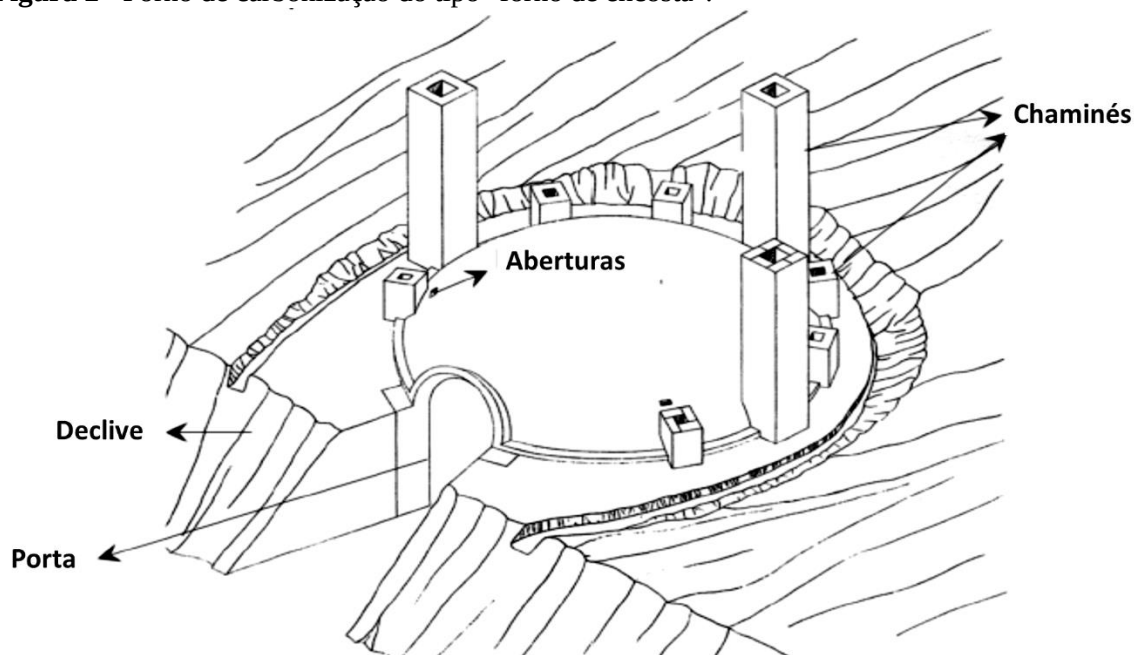


Fonte: Rodrigues & Braghini Junior (2019).

4.2.2 Forno de encosta

Em algumas regiões do país, em que há a presença de área acidentadas, são comuns à presença de fornos de encosta (Figura 2). A construção desse tipo de forno aproveita o desnível do relevo e utiliza-o como parede, o que consequentemente 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*. Porém, o resfriamento pode ser mais lento, prolongando o ciclo de produção e também é uma construção que depende de áreas acidentadas (RODRIGUES; BRAGHINI JUNIOR, 2019).

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



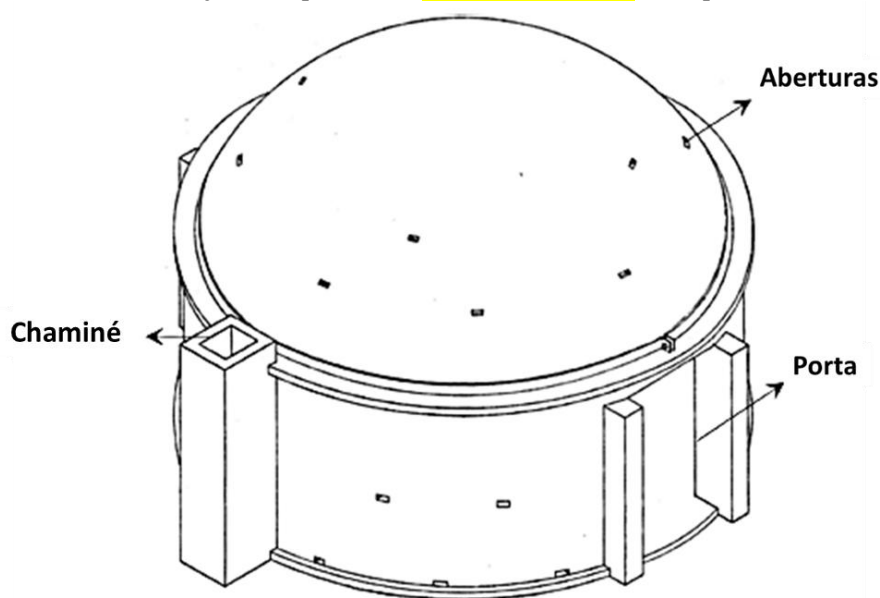
Fonte: Rodrigues & Braghini Junior (2019).

4.2.3 Forno cilíndrico esférico de superfície

Outros fornos surgiram como resultado de melhorias dos fornos mais rústicos como, por exemplo, o forno cilindro esférico 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 do outro é a presença da chaminé em sua lateral (podendo variar de um até seis), inserida com o objetivo de melhorar o fluxo internos dos gases gerados no processo de pirólise. Esse tipo de forno pode apresentar de uma a duas aberturas de carregamento, que

serve também como pontos de entrada de ar, sua arquitetura permite que a carbonização seja realizada de maneira mais uniforme, o que consequentemente melhora o rendimento e a eficiência (ARRUDA et al., 2011; SOUZA et al., 2016).

Figura 3 - Forno de carbonização do tipo "forno cilíndrico esférico de superfície".

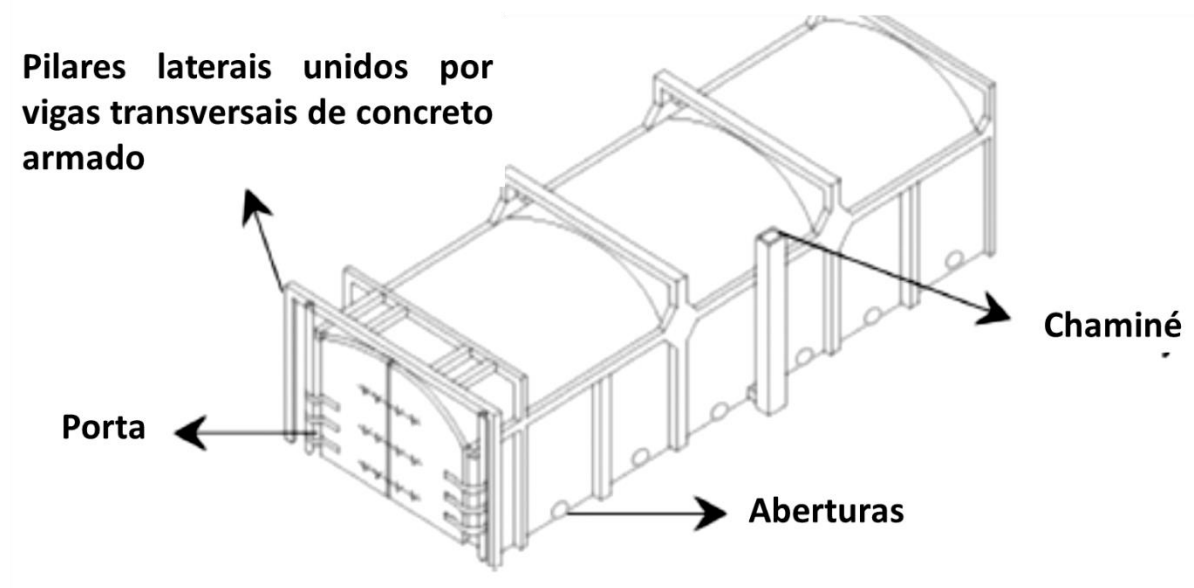


Fonte: Rodrigues & Braghini Junior (2019).

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, que permitissem a mecanização e tornassem 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 através de um canal de ligação faz integração com o forno principal. Este anexo serve principalmente como controlador do fluxo de ar, no qual também circulam os gases aquecidos. Através 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). Cabe ressaltar que os avanços relacionados a esse tipo de forno não permitem o controle completo da produção, em muitos casos a carbonização não ocorre de maneira homogênea, pois muitos processos acontecem de maneira natural (o que é isso?). 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 consequentemente maior rendimento gravimétrico (GUIMARÃES NETO et al., 2007; SANTOS et al., 2017).

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



Fonte: Rodrigues & Braghini Junior (2019).

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, além do desenvolvimento 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 Arcellor Mittal 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. Sua estrutura é bem mais sofisticada, possuindo pilares e vigas de sustentação (podendo ser construída de aço ou concreto armado) que conferem maior resistência a esse tipo de forno. Esses fornos possuem quatro entradas (?) possuindo instrumentos que controlam o fluxo de ar no interior do forno (?). O MF1-UFV além de permitir um maior controle do processo de carbonização, também permite um maior controle da emissão dos gases do efeito estufa (CARDOSO et al., 2010; CARVALHO et al., 2012). (explicar esse controle da emissão gasosa)

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

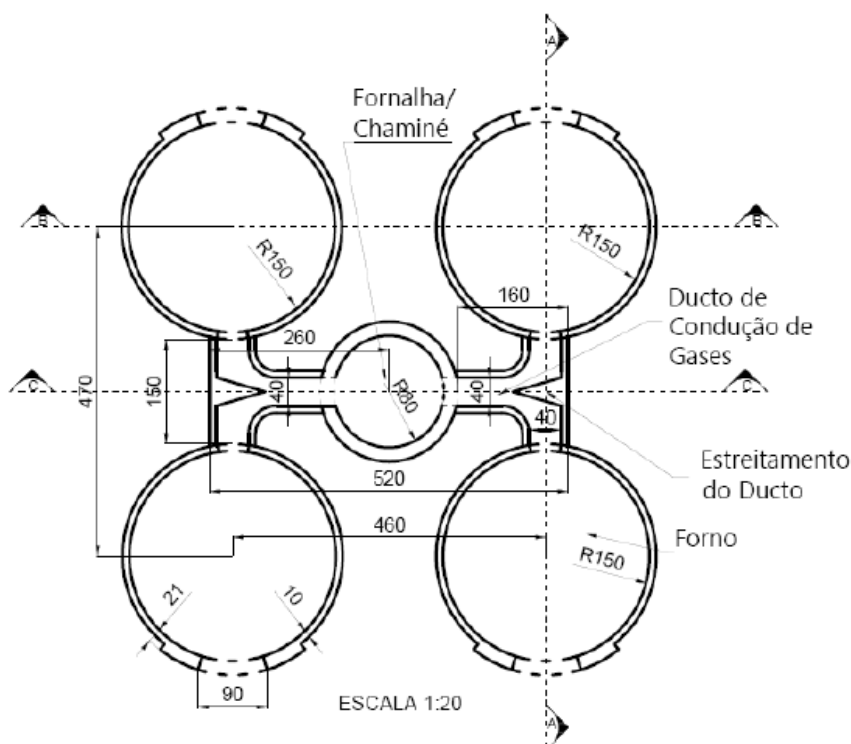


Fonte: Cardoso et al. (2010).

4.2.6 Forno acoplado a fornalha

Além desses fornos, existem também outras adaptações, consideradas avançadas, principalmente quando visto pelo lado ambiental, um sistema forno fornalha, nada mais é que um forno circular construído em superfície, que pode conter de uma a seis aberturas (de que?) de entrada principais (Figura 6). Esse tipo de forno se diferencia dos demais pela presença de dutos, no qual os gases gerados no processo de pirólise são conduzidos pela pressão negativa gerada pela chaminé até a fornalha principal (que 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 – Planta baixa do forno fornalha.



Fonte: Oliveira et al. (2013).

4.2.7 Fornos metálicos

Em algumas matrizes industriais a utilização de fornos em alvenaria foi substituída por outros mais evoluídos, é o caso de carbonizadores de metais. Este sistema é mais eficiente na produção de carvão vegetal, devido o maior controle do processo, o que consequentemente reflete diretamente no rendimento, tempo de carbonização, tempo de resfriamento e na qualidade do carvão produzido (FIGUEIRÓ et al., 2019a). Além dos benefícios inerentes a produção, eles também são conhecidos pela importância no sentido ambiental, que se dá pelo controle de gases emitidos durante o processo de carbonização, uma vez que 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 também permitem o aproveitamento de subprodutos oriundos do processo de carbonização, devido possuir 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).

Os principais fornos metálicos disponíveis no mercado são: “Isomóvel”, Magnien, DPC (Drying Pyrolysis and Cooling) e o forno Bricarbras, entretanto a utilização desses fornos

por pequenos, médios e até mesmo grandes produtores de carvão são limitados ao custo inicial do investimento, o que dificulta a mudança dos fornos rudimentares para os fornos metálicos (OLIVEIRA et al., 2013; DONATO et al., 2017; SOUZA et al., 2016).

Diante dos aspectos abordados, pode-se observar que a escolha do forno não é algo simples de ser definido, deve-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 e o nível de sustentabilidade do empreendimento. 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

A carbonização é um processo de pirólise lenta, que envolve a degradação térmica da madeira, 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, **NO, SO**) (ARANTES et al., 2013). **(que gases são esses?)**

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 **das hemiceluloses**, celulose e lignina; Etapa III - início do processo de carbonização, com temperatura variando de 275 a 400°C, ocorre a 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).

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 área sob plano 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 o aproveitamento do que seria desprezado na floresta 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. 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, 2018a). Na prática, 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 da madeira posta no interior do forno são em muitos casos 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 variável 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, **entre eles** pode-se citar a 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 g cm⁻³), densidade energética (9,4 – 16,8 GJ m⁻³), extrativos totais (1,8 – 17,9%) e lignina total (30,2 – 38,1%) **em resíduos madeireiros da Amazônia** (LIMA et al., 2020a). As variações mencionadas incluem resíduos com propriedades até superiores que madeiras de eucalipto, que é a principal matéria prima utilizada na produção **de carvão vegetal** no Brasil.

Estudo conduzido por Gouvêa et al. (2015) **mostrou** valores de lignina para madeiras de *Eucalyptus* sp. variando de 28,08 a 31,70%. Por outro lado, os carvões oriundos de resíduos **madeireiros da Amazônia** 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 com energia considerável estocada por unidade de volume, que pode ser muito bem utilizada nos altos fornos siderúrgicos para produção de ferro gusa.

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, **afetam** negativamente o rendimento gravimétrico. Por outro lado, temperaturas baixas podem culminar em maior produção de atijo, 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 química e física das madeiras destinados a produção de carvão vegetal e as variáveis de processo, visando a otimização e modernização dessa atividade, uma vez que 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,

especialmente, os industriais (BRAND et al., 2015; OLIVEIRA et al., 2014; SILVA et al., 2019).

4.5 Propriedades do carvão vegetal destinados ao uso doméstico e industrial

Há muito tempo o homem utiliza a biomassa vegetal como fonte de combustível para a geração de energia, principalmente para a cocção de alimentos, também empregado como fonte de 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, entre outras finalidades (DIAS JÚNIOR et al., 2015).

O carvão vegetal quando produzido utilizando de pacote tecnológico adequado e considerando a qualidade da madeira, apresentará boa qualidade. Não é possível assegurar uma boa eficiência de conversão e a qualidade do carvão produzido, quando não se tem controle do processo e da matéria prima enfiada (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 produzido depende principalmente da espécie florestal (densidade básica, teores de lignina e minerais), idade e do sistema de carbonização adotado (ARANTES et al., 2020; SOARES et al., 2014). No entanto, para que seja determinada as propriedades da biomassa carbonizada, são necessários a realização de testes, em que a finalidade vise quantificar as potencialidades do carvão produzido, entre elas o poder calorífico, densidade relativa aparente, teores de 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 as exigências do consumo residencial, pois possuem finalidades distintas e necessitam de características específicas para ser utilizado como agente redutor de minério de ferro e isso contribui com o

maior controle da cadeia de produção que atendem essa finalidade (ANATER et al., 2019; COUTO et al., 2015)

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 comercializados no Estado destinados ao uso residencial, o carvão vegetal para receber o selo premium deve atender a alguns requisitos, entre eles pode-se citar a não apresentação de fragmentos de madeira semicarbonizada; conteúdo de carbono fixo igual ou superior a 73%; umidade inferior a 5%; conteúdo de cinzas abaixo de 1,5%; densidade 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% 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 o mínimo de qualidade para o consumo doméstico (OLIVEIRA et al., 2019). A utilização de carvão com qualidade inferior pode acarretar em sérios riscos à saúde humana, entre elas o câncer, uma vez que durante a queima do carvão substâncias tóxicas são liberadas. O carvão de qualidade idônea deve assegurar ao consumidor das condições do produto (OLIVEIRA et al., 2015). 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

~~O processo de pirólise da madeira é considerado um processo bastante complexo, sobretudo por ser constituído 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).~~ Deve ser informado sobre combustibilidade e combustão.

As variações de massa são medidas pela análise termogravimétrica (TGA), enquanto 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”). A TGA nos diz quando a amostra está perdendo massa e quanto é esta massa, em função do tempo ou temperatura, e a DTA e DSC

nos informa se a reação é exotérmica (libera calor) ou endotérmica (absorve calor), sendo o DSC capaz de fornecer a quantidade de calor envolvido (VÁSSIA, 2011).

O estudo da combustibilidade da madeira por meio da análise termogravimétrica (TGA) é uma alternativa importante para avaliar biomassas lenhosas com potencial para carbonização e combustão. Este método permite observar e entender os fenômenos térmicos de decomposição da madeira e seus constituintes moleculares em diferentes faixas de temperatura (FIALHO et al., 2019; GARCIA et al., 2016). Através da TGA, também é possível estabelecer parâmetros físicos relacionados ao processo de pirólise, criando padrões de condições térmicas ideais para as reações de conversão da madeira em carvão baseados nos estágios de degradação dos constituintes da biomassa (JANKOVIĆ et al., 2019; PROTÁSIO et al., 2019; SILVA et al., 2021). Os principais parâmetros analisados na combustão do carvão são a temperatura de ignição (T_i), temperatura de burnout (T_b), temperatura máxima (T_{max}), 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).

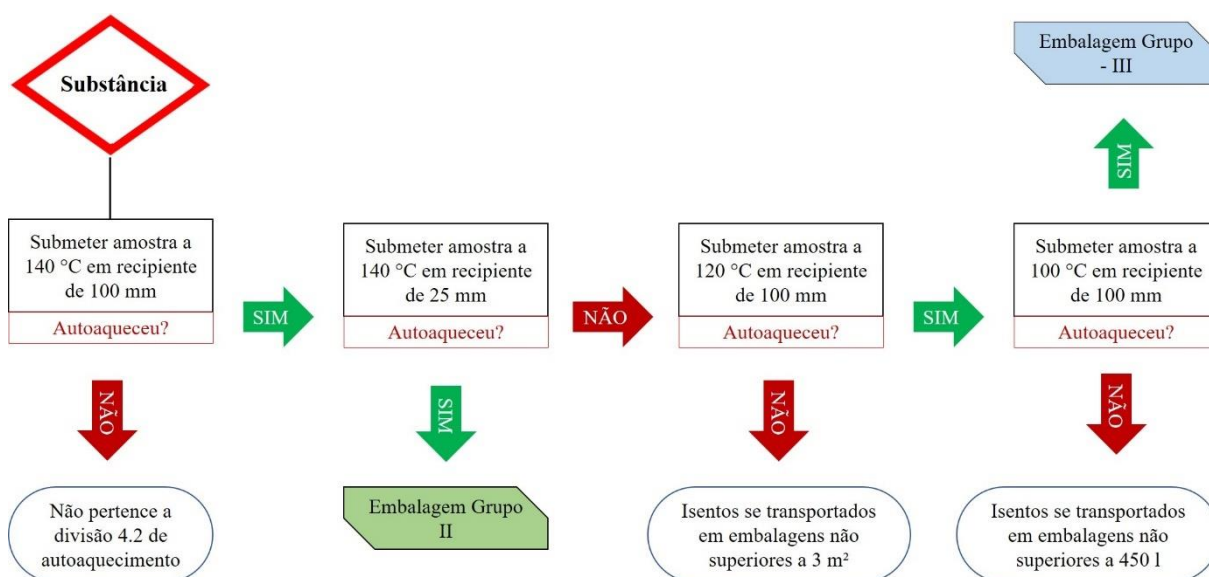
A temperatura de ignição é definida como a temperatura na qual a taxa de combustão aumenta 1%/min, ou seja, quando se iniciou o maior processo de combustão. A temperatura de burnout é a temperatura final de combustão, definida como temperatura na qual a taxa de combustão diminui a 1%/min (MOON et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2017). O índice característico da combustão (S) reflete a reatividade durante todo o processo de combustão, ou seja, biocombustível com maior valor de S tem melhor desempenho na combustão (PROTÁSIO, 2016). O índice de ignição representa a performance durante a ignição e a reatividade da biomassa, portanto, quanto maior for este índice melhor será o desempenho durante o processo de combustão da biomassa (XIONG et al., 2014; PROTÁSIO, 2016). Em resumo, S , C_i e D_i , indicam reatividade à combustão, inflamabilidade e facilidade de ignição, respectivamente (COSTA et al., 2020).

A literatura apresenta carência de estudos relacionados combustibilidade do carvão vegetal. Estudo de Massuque et al. (2021) demonstrou que carvões de espécies do bioma Miombo no norte de Moçambique, especialmente da espécie *Uapaca kirkiana*, apresentaram performance promissora, com elevados índices de combustibilidade ($1.37 \times 10^4 \text{ } \% \text{ min}^{-1}/^\circ\text{C}^2$) e ignição ($13,13 \times 10^3 \text{ } \% \text{ min}^{-3}$). Protásio et al. (2017) avaliaram carvões de noz 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 queima, o tempo de ignição e a taxa máxima de combustão. Além disso, os carvões produzidos em altas temperaturas apresentam maior dificuldade de combustão.

Além do estudo de combustibilidade, entender a combustão espontânea do carvão implica em definir estratégias relevantes para o transporte desse insumo. A combustão espontânea, também denominada de autocombustão, é o fenômeno que ocorre mediante o auto aquecimento da biomassa, com temperaturas acima do ambiente, capazes de promover a combustão, conhecer eventuais possibilidade da combustão é fundamental para reduzir os riscos de acidente no ambiente de armazenamento e também durante o transporte (BATISTELLA et al., 2016). O processo de autocombustão, pode acontecer durante o período de carbonização, principalmente quando não se há o menor controle possível por parte do operador ou, até mesmo, após o fim do ciclo de carbonização, quando não é realizado o resfriamento de maneira adequada (DIAS et al., 2002; ROHDE, 2005).

O carvão vegetal é considerado um produto sujeito à combustão espontânea no Brasil, sendo enquadrado na classe de risco 4.2 da Resolução da Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT (2004). 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 da ONU (2009) que comprove que a substância não está sujeita à combustão espontânea. Esse processo ocorre quando a taxa de produção de calor excede a taxa de perda e a temperatura de auto-ignição é atingida. O tempo de exposição ao calor é o fator determinante para ocorrer a autocombustão (ONU, 2009). O Manual de Ensaio e Critérios de Recomendação sobre o Transporte de Mercadorias Perigosas pode ser visualizado na Figura 7.

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



Fonte: ONU (2009).

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.antt.gov.br/index.php/content/> > 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**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 494-504, set. 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**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, jul./set. 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**, Piracicaba, v. 36, n. 78, p. 133-140, jun. 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, mar., 2016.
- 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**, Viçosa, MG, v. 39, n. 6, nov./dez., 2015.
- BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 185 – 193, 2007.
- 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, Suplemento, 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**, Curitiba, PR, v. 46, n. 4, p. 473 - 480, out. / dez. 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**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 787-796. 2012.
- 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, out., 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 Conersion 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**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, dez. 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.

- 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**, Piracicaba, 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**, Viçosa-MG, 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**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 269-277, jan-fev, 2002.
- DONATO, D. B.; MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S.; CANAL, W. D.; SILVA, M. L. Viabilidade econômica de diferentes sistemas de produção de carvão vegetal em escala industrial. **Ciência da Madeira**, n. 8, v. 3, p. 143-149, 2017.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Brazilian energy balance - year 2019**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2020.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050**. Rio de Janeiro: MME/EPE, 2018a.
- 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**, Recife, v. 14, n. 3, 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**, Recife, v. 14, n. 3, p. e5659, 2019a.
- 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**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1436-1451, jul./set. 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**, Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 677-687, jul./set. 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**, Viçosa, MG, v. 31, n. 4, p. 709-715, Aug. 2007.

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.

JANKOVIĆA, 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.

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.

KATO, M.; MARINI, D. M.; CARVALHO, A. B.; REGO, M. A. V.; ANDRADE, A. V.; BOMFIM, A. S. V.; Loomis, d. World at work: charcoal producing industries in northeastern Brazil. **Occupational Environmental Medicine**, v.62. n.2, p.128-132, 2005.

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.
- 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**, Viçosa-MG, 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**, Viçosa, 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**, Seropédica, v. 24, 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**, Recife, PE, v. 15, n. 4, 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**, Curitiba, PR, v. 44, n. 1, p. 143 - 152, jan. / mar. 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. Fifth revised edition. 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, 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, abr.-jun., 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.
- 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. 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.
- 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**, Viçosa-MG, 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**, 2019, 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: CIENTEC, 2005, 53 p.
- 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, mai., 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, 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, terça-feira, 15 de dezembro de 2015.
- 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**, Pelotas, 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**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 536-544, set. 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**, Viçosa-MG, 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**, Colombo, v. 40, 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**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 412-419, jan.- mar., 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**, Manaus, 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**, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1168-1179, jul./set. 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**, Viçosa-MG, 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**, Seropédica, v. 23, n. 2, p. 270-277, jun. 2016.

- 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* 2009;30:237-97.
- 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

Biomass and Bioenergy (JCR 5,061/Qualis Capes A1)

Resumo

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 heterogênea. A segregação das madeiras na unidade produtora pode ser uma solução para homogeneizar a matéria prima e melhorar a qualidade do carvão vegetal. Esse estudo teve como objetivo principal analisar a **influência** da segregação dos resíduos **na** qualidade do carvão vegetal visando a utilização siderúrgica. 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). O grupo 1, formado por carvões de galhos 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, o grupo 5 (carbonização convencional) se mostrou muito variável, com carvões mais friáveis e menos resistentes **(que resistência?)**. O estudo

revelou que a segregação de madeiras residuais culminou na elevação da qualidade do carvão vegetal produzido nos fornos de alvenaria. As propriedades que apresentaram influência positiva da segregação foram densidade relativa aparente, friabilidade, teor de cinzas, teor de carbono fixo, poder calorífico superior e densidade energética. Estes 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 heterogênea, 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 redutor do minério de ferro. O carvão vegetal também tem sido utilizado para as finalidades domésticas, como 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 (IBGE, 2020). Esse sucesso 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 em florestas energéticas, pois apresentam rápido crescimento e elevada produtividade (FIGUEIRÓ et al., 2019b; IBGE, 2020; IBÁ, 2020). Além disso, a madeira dessas espécies possui propriedades físicas e químicas adequadas para a produção de carvão vegetal, como elevada densidade (?), baixos teores de umidade e alto conteúdo de extrativos e lignina (BRITO, 1993; OLIVEIRA et al., 2010).

Na região Norte do Brasil, os reflorestamentos com espécies de *Eucalyptus* ainda são incipientes, devido a fatores bioedafoclimáticos como a baixa pluviosidade, 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 (sapopemas, restos de troncos 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. Contudo, esses resíduos e os carvões produzidos são muito heterogêneos por serem oriundos de diversas espécies com constituições químicas distintas (SILVA et al., 2020). Além disso, a produção de carvão com resíduos na Amazônia é majoritariamente realizada em fornos de alvenaria de baixa tecnologia associada denominados de ~~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%), intervalos bem amplos, indicando alta heterogeneidade (LIMA et al., 2020b), embora os limites superiores dessas variações sejam mais elevados do que os valores médios dessas propriedades para carvões comerciais de *Eucalyptus*.

Uma solução para redução da heterogeneidade dessa matéria prima é a segregação antes da carbonização em 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 nas receitas da indústria. 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; (ii) estudar as variações da qualidade desses combustíveis sólidos entre grupos de resíduos, entre fornos de alvenaria e

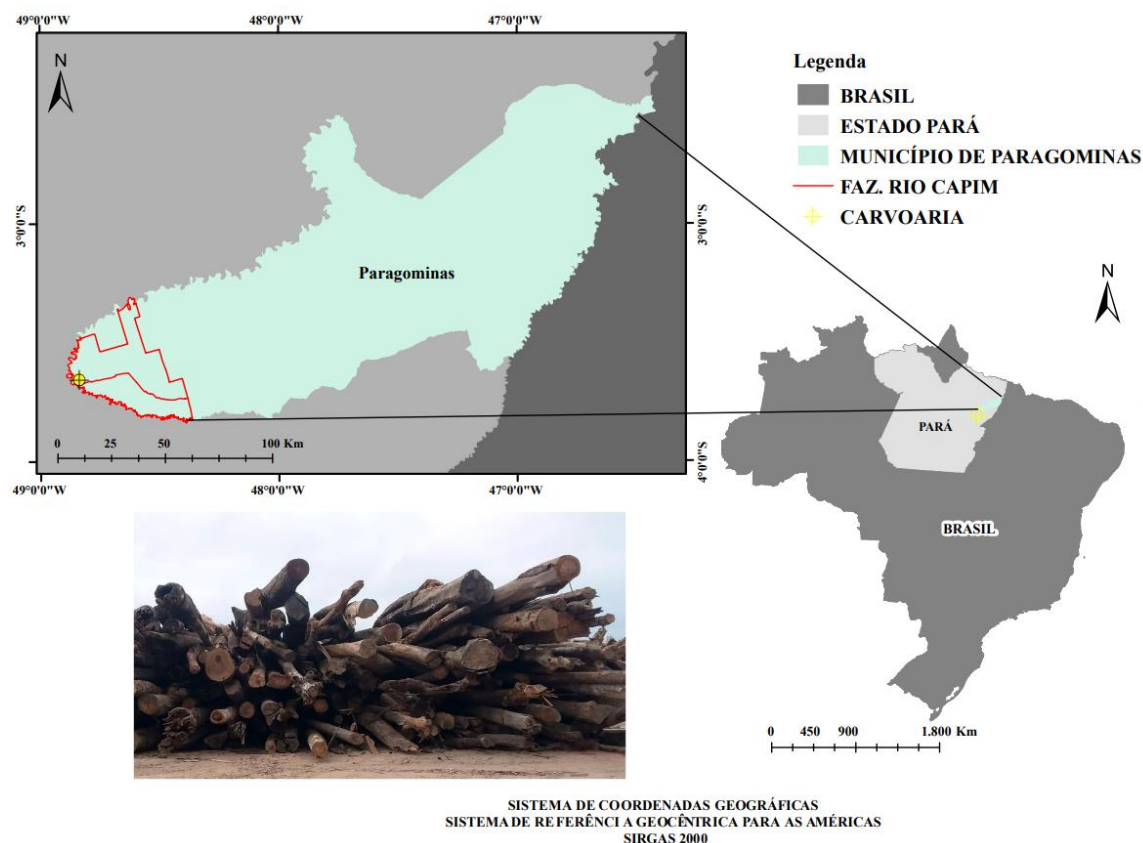
dentro do mesmo grupo; e (iii) analisar como a segregação dos resíduos influencia na qualidade do carvão vegetal.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Origem do material biológico

As madeiras residuais utilizadas na produção do carvão vegetal, alvo desse estudo, 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 na propriedade 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.

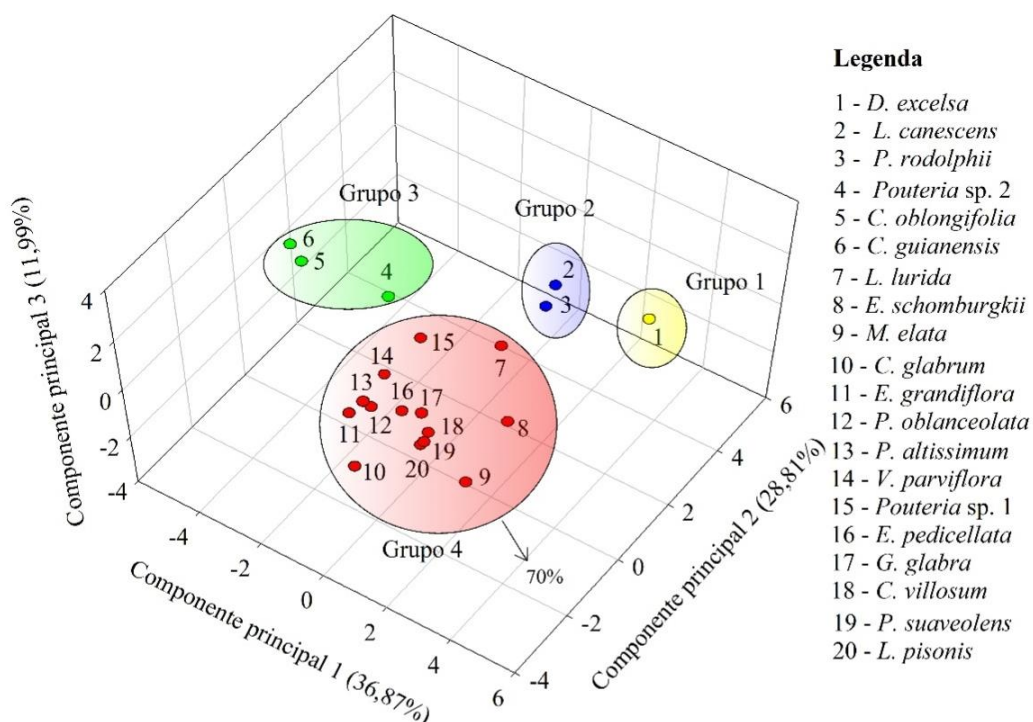


5.2.2 Segregação dos resíduos madeireiros para produção de carvão vegetal

A segregação das madeiras residuais do manejo florestal sustentável baseou-se em estudos prévios, como o de 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, que infere sobre a quantidade de lenha em volume necessária para a produção de 1 tonelada 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 a 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 realizada na UPC Rio Capim para verificar se essa metodologia pode melhorar a qualidade do carvão vegetal produzido na unidade. 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 usar madeiras de baixa densidade para simular a forma tradicional de carbonização na Amazônia. Todas as espécies utilizadas nesse estudo estão descritas na Tabela 1. 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 a retirada de corpos de prova com dimensões de 4 cm x 4 cm x 4 cm para a 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).

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

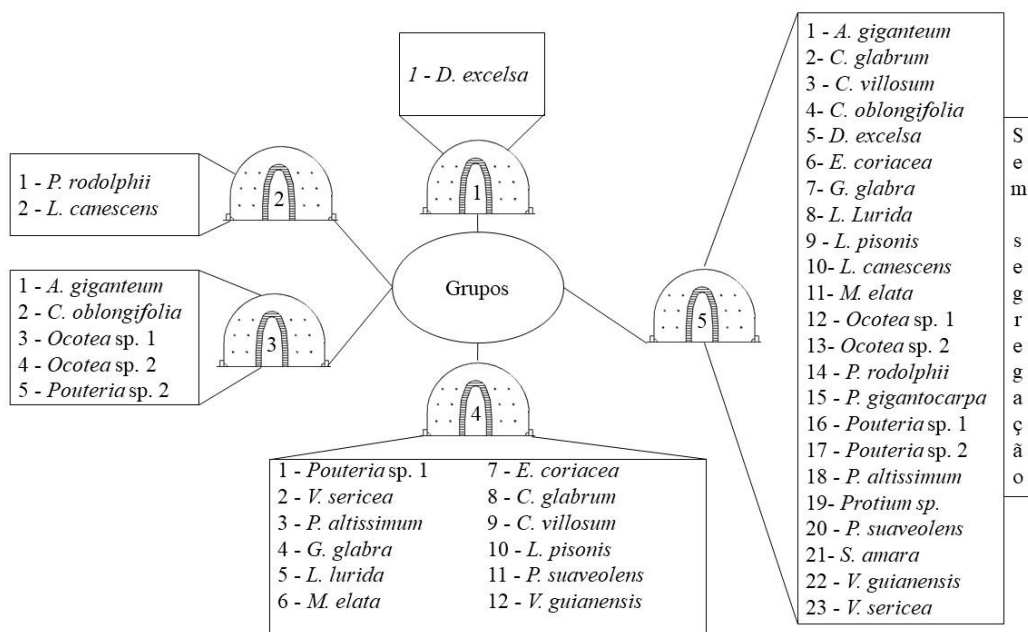
N	Familia	Nome científico	Nome comum
1	Anacardiaceae	<i>Anacardium giganteum</i> W.Hancock ex Engl.	Cajuaçu
2	Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	Breu-barrote
3		<i>Protium</i> sp.	Breu-amesclim
4	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiarana
5		<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá
6	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	Casca-Seca
7		<i>Parinari rodolphii</i> Huber	Coco-pau
8	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba
9	Humiriaceae	<i>Vantanea guianensis</i> Aubl.	Uxirana
10	Lauraceae	<i>Ocotea</i> sp. 1	Louro-amarelo
11		<i>Ocotea</i> sp. 2	Louro-preto
12	Lecythidaceae	<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	Tauari-branco
13		<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	Matamatá-branco
14		<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia
15		<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	Jarana
16	Leguminosae -Mimosoideae	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho
17		<i>Parkia gigantocarpa</i> Ducke	Fava-atanã
18		<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Timborana
19		<i>Vatairea sericea</i> (Ducke) Ducke	Angelim-amargoso
20	Sapotaceae	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba

21	<i>Pouteria</i> sp. 1	Abiorana
22	<i>Pouteria</i> sp. 2	Guajará-bolacha
23	Simaroubaceae	Marupá

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 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 para a retirada 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).

5.2.3 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). Ressalta-se que uma caixa metálica foi suficiente para acondicionar todo o carvão produzido em cada forno (Figura 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 recipientes de aproximadamente 20 kg de carvão vegetal de forma aleatória por caixa metálica (Figura 11D), o que totaliza 100 kg amostrados.

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.

5.2.4 Qualidade do carvão vegetal

As propriedades físicas (densidade relativa aparente e umidade), mecânica (friabilidade), química (imediata – 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. Além disso, foi realizada o percentual de rachaduras dos carvões.

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. Das amostras de carvão coletadas de cada fornada, foram preparados 5 corpos de prova por **recipiente de coleta**, com dimensões variáveis, para determinação da DRA. Essa propriedade foi calculada com a Equação 1.

$$DRA = \frac{MSC}{VS} \quad (1)$$

Em que: DRA - Densidade relativa aparente do carvão (g.cm^{-3}), MSC - Massa seca do carvão em estufa a 102 °C (g); e VS = Volume do carvão com os espaços vazios completamente preenchidos por água (cm^3).

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 (Figura 12A) de carvão de cada **recipiente** de amostragem, **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 (Mi). Posteriormente, cada amostra foi submetida a esforços de choque e atritos a 30 rpm, em um tambor rotatório elétrico, por 15 minutos (Figura 12B).

Figura 12 - Amostras de carvão utilizadas (A) e tambor rotatório elétrico utilizado no teste (B).



Fonte: Do autor.

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

$$F = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (2)$$

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

Os carvões vegetais foram classificados quanto a friabilidade de acordo com o recomendado por Oliveira et al. (1982) (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificação da friabilidade do carvão vegetal.

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

Fonte: Oliveira et al. (1982).

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 com base na norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

O poder calorífico superior (PCS) dos carvões foi estimado por meio da Equação 3, 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 4).

$$PCS = (0,3543 \times CF) + (0,1708 \times MV) \quad (3)$$

$$DE = PCS \times DRA \quad (4)$$

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

5.2.5 Análises estatísticas

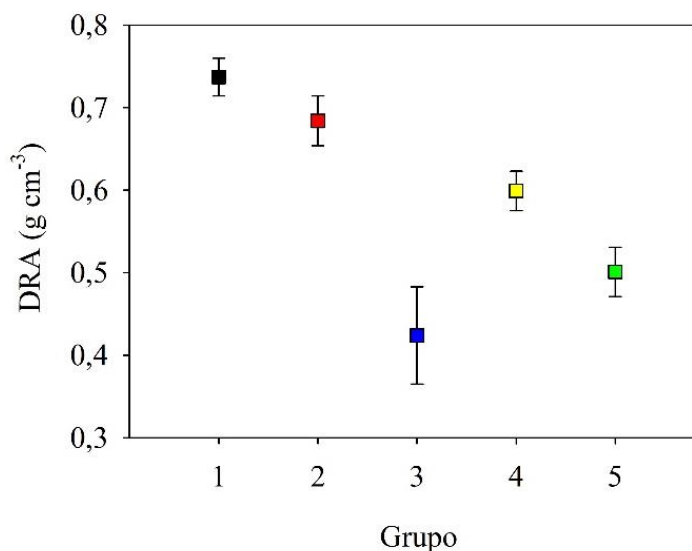
As análises estatísticas consistiram em análise de variância (ANAVA) e teste de médias. Antes da ANAVA, os pressupostos de normalidade de resíduos, homocedasticidade de variâncias e autocorrelação de resíduos foram analisados por meio do teste de Shapiro-Wilk ($p \leq 0,05$), Bartlett ($p \leq 0,05$) e Durbin-Watson ($p \leq 0,05$), respectivamente. Para as comparações múltiplas das médias, o teste de Scott-Knott foi **utilizado**, em 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. Além disso, a relação entre a densidade relativa aparente do carvão e poder calorífico superior com a densidade energética do carvão vegetal. Finalmente, modelo polinomial de natureza quadrática foi ajustado para verificar o grau de associação entre as duas propriedades mencionadas (**quais?**). Todas as análises foram realizadas em linguagem R, versão 3.6.2 (R CORE TEAM, 2019).

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Efeito da segregação na densidade relativa aparente do carvão vegetal

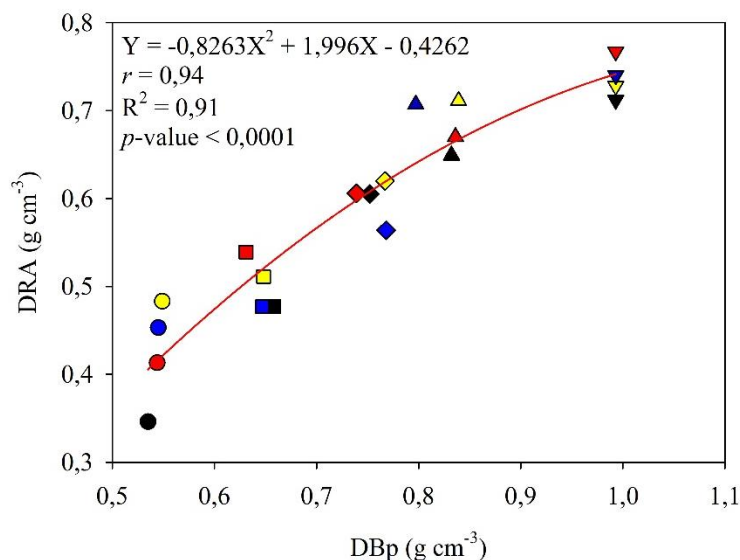
A segregação das madeiras residuais do manejo florestal sustentável influenciou positivamente a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Nota-se efeito significativo de grupo pelo teste de Scott-Knott (Figura 13). O grupo 1, formado pela espécie *D. excelsa*, apresentou carvão vegetal com maior 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 ($0,501$), formado por todas as espécies misturadas. Em ordem quanto ao potencial de uso siderúrgico, destacam-se os grupos 1, 2, 4, 5 e 3.

Figura 13 – 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.



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 14). 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. 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 de carvão vegetal, e os carvões dos grupos 1, 2 e 4, que são superiores aos carvões do grupo 5, são adequados ao uso siderúrgico e aptos para comercialização com base na massa.

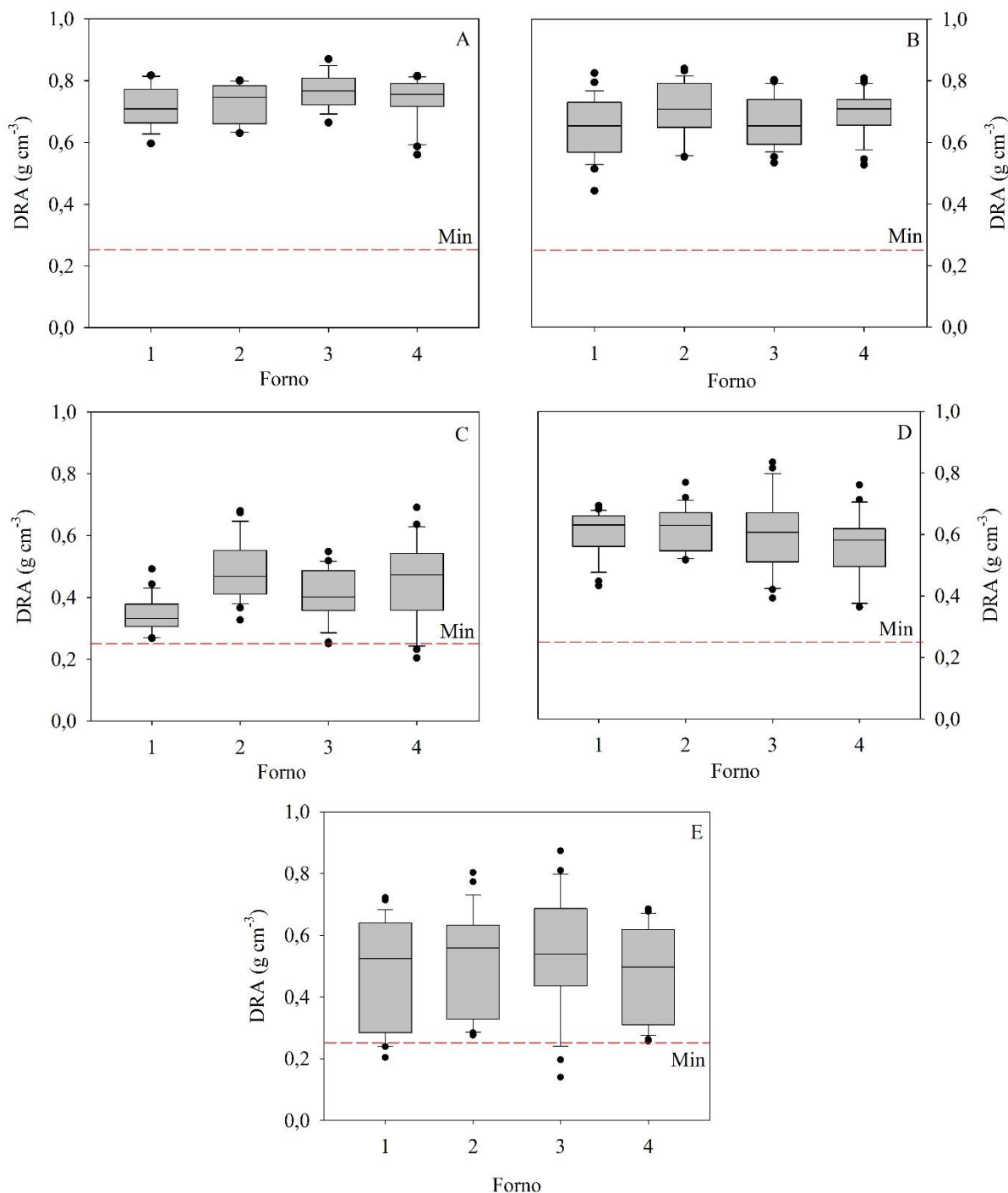
Figura 14 – Relação entre a densidade básica ponderada das madeiras (DBp) e a densidade relativa aparente do carvão vegetal de grupos de espécies segregadas e não segregadas por forno de alvenaria.



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

Alta variabilidade da DRA dos carvões vegetais entre fornos de alvenaria dos grupos 3 e 5 foi observada por meio do alto intervalo de quartil dos boxplots (Figura 15). Essa alta variabilidade foi ainda mais pronunciada nos fornos em que foram produzidos carvões com madeiras não segregadas (grupo 5). Por outro lado, a variabilidade entre fornos foi menor nos grupos 1, 2 e 4, que correspondem aos grupos de espécies com propriedades similares. A literatura aponta que carvões com DRA acima de $0,250 \text{ g cm}^{-3}$ são adequados para o uso siderúrgico (ASSIS et al., 2016). Nesse estudo, valores abaixo dessa referência 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 $0,873 \text{ g cm}^{-3}$, **significando** diferença de $0,733 \text{ g cm}^{-3}$. Os grupos 1, 2 e 4 apresentaram menores variações de DRA entre fornos pois as propriedades tecnológicas dessas madeiras são similares, o que contribuiu para uma carbonização mais controlada e homogênea. Do ponto de vista de mercado, se uma empresa se interessar em negociar carvão vegetal oriundo de madeiras não segregadas negociará um produto altamente variável. Esse resultado é explicado pela ampla variação das propriedades físicas e constituição química das espécies que compõem esse grupo. Assim, a produção de carvão vegetal com madeiras não separadas culmina em redução da qualidade do bio redutor, o que não é interessante para a indústria, pois implica na redução de receitas.

Figura 15 – 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.

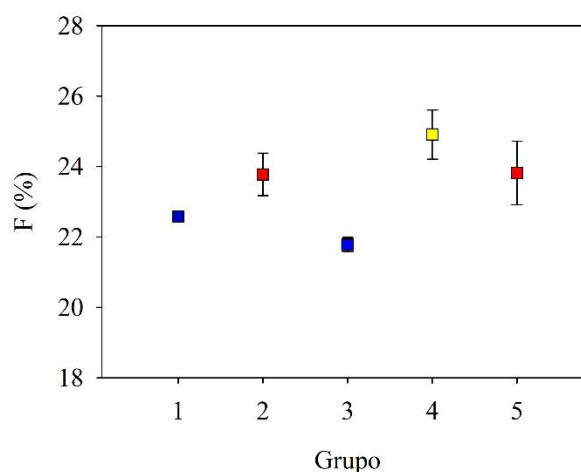


5.3.2 Efeito da segregação na friabilidade do carvão vegetal

O teste de Scott-Knott demonstrou efeito significativo da segregação das madeiras residuais sob os valores de friabilidade (F) dos carvões vegetais (Figura 16). Os valores médios de F 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 (5), que representa a carbonização convencional, 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 16 – 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.



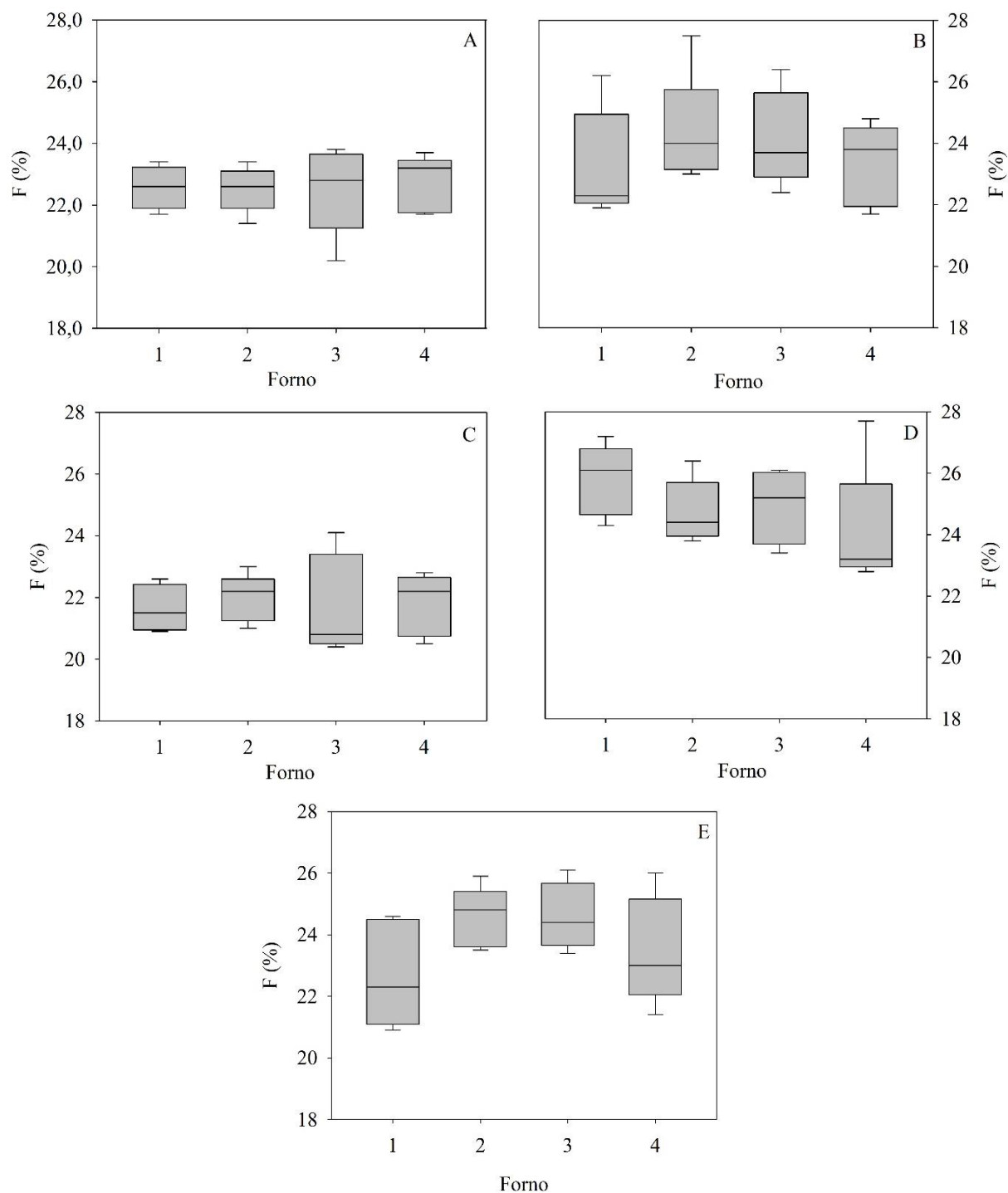
A friabilidade é uma importante propriedade do carvão vegetal utilizada nos estudos especialmente para inferir sobre sua resistência mecânica. Essa característica está relacionada a propensão do carvão vegetal em se fragmentar em frações de menores dimensões devido a ação combinada de abrasão e choques, especialmente durante o manuseio (DUFOURNY et al., 2019; SILVA; ATAÍDE, 2019). 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 e rampa de aquecimento) (DUFOURNY et al., 2019; SILVA; ATAÍDE, 2019), umidade (SILVA; ATAÍDE, 2019), densidade aparente e porosidade do carvão vegetal (RAMOS et al., 2019).

Com base no estudo de Lima (2020), a variação do diâmetro dos toretes enfiados dos grupos 1 (0,354 – 0,450; 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 a 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) **apresentou** maior friabilidade do que a classe de menor diâmetro (7,5 – 10 cm). Além disso, a carbonização empírica pode ter influenciado essa propriedade 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 17. Os grupos 1 e 3 se mostraram mais homogêneos se comparados aos demais grupos. Com relação aos boxplots, os grupos 2, 4 e 5 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. Entende-se que essa 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 a redução da friabilidade do carvão vegetal e a melhoria da qualidade do bioredutor 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.

Figura 17 – Friabilidade dos carvões vegetais de madeiras residuais dos grupos 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D) e 5 (E) por forno de alvenaria.

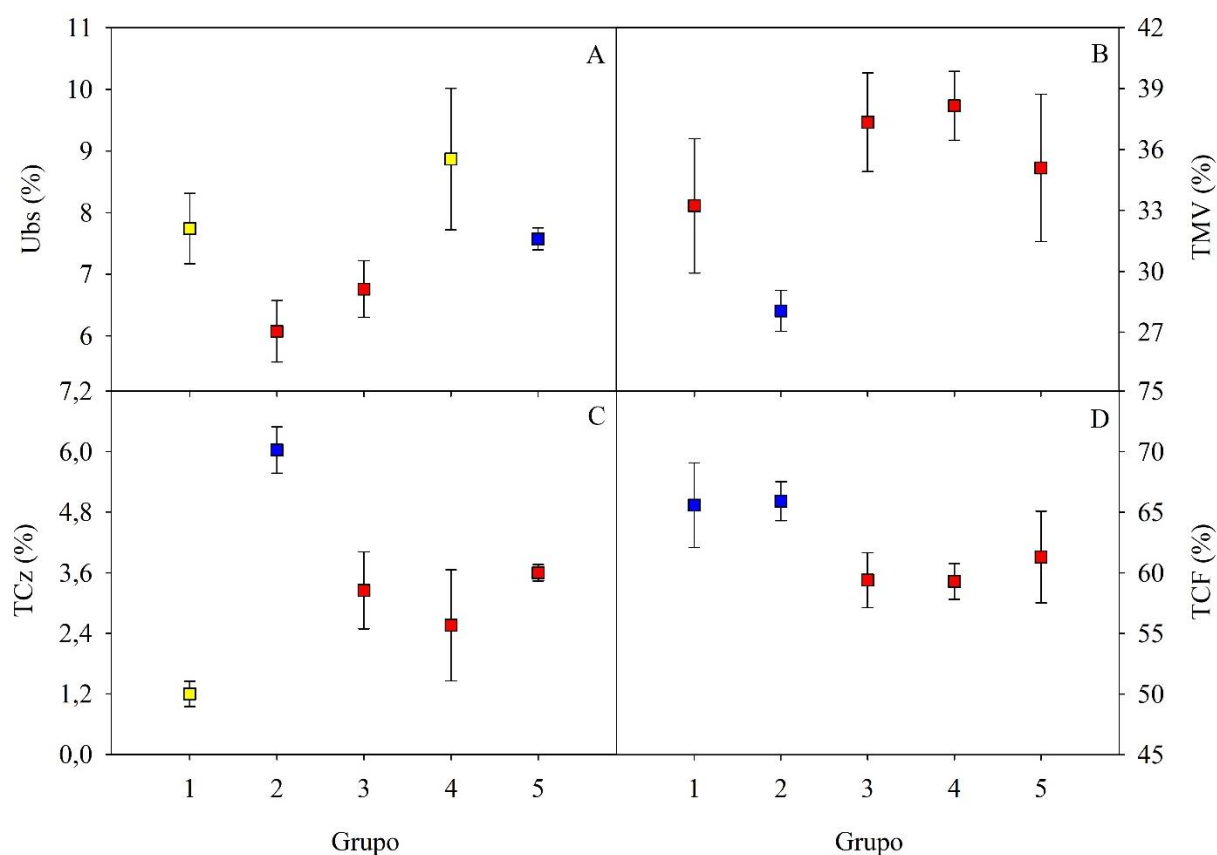


5.3.3 Efeito da segregação na constituição química imediata do carvão vegetal

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%), teor de cinzas (TCz: 1,20 – 6,03%) e teor de carbono fixo (TCF: 59,29 – 65,91%) (Figura 18). Os valores reportados nesse estudo, embora seja resultante de segregação de matéria prima visando a melhoria da qualidade do carvão vegetal, **foram afetados** pela baixa tecnologia empregada nos fornos de alvenaria do tipo rabo quente e pela condução do processo, ainda realizado de forma empírica. Isso pode ser evidenciado nos valores de TCF, que foram inferiores ao destacado na literatura como adequado (75 - 80%) para a finalidade siderúrgica (PEREIRA et al., 2016).

Figura 18 – 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.



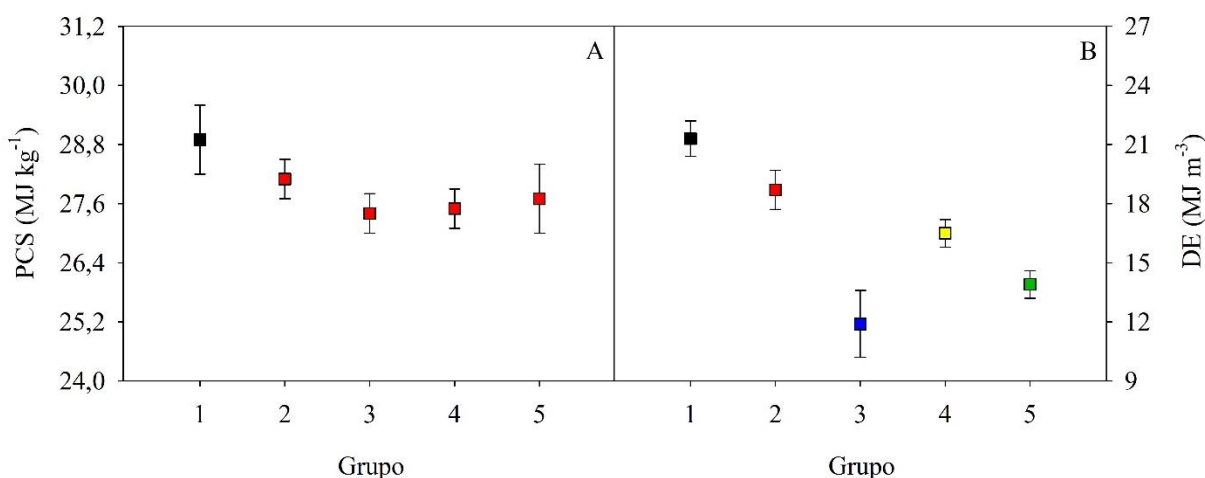
Os resultados desse estudo indicam que os grupos 1 e 2 se destacaram quanto aos valores de Ubs, TMV e TCF. Comparativamente ao grupo 5 (testemunha), os grupos 1 e 2 foram superiores no TCF em 7,0% e 7,5%, respectivamente. Por outro lado, o grupo 2 apresentou o maior valor médio de TCz (6,03%), o que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

acumula minerais no centro do metal solidificado (LIMA et al., 2020b). Com base nesse mesmo estudo, os carvões das espécies *L. canescens* e *P. rodolphii* apresentaram o TCz de 9,60 e 3,4%, 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 espécie, credenciando os grupos 1 (1,20%), 3 (3,25%) e 4 (2,56%) para o uso industrial devido aos menores valores médios dessa variável química.

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 19). O poder calorífico superior (PCS: 27,4 – 28,9 MJ kg⁻¹) e a densidade energética (DE: 11,6 – 21,3 MJ m⁻³) apresentaram variação significativa nos valores médios entre os grupos.

Figura 19 – 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 (elevado?) TCF (65,6%) verificado para os carvões desse grupo. Os grupos 2 (28,1), 3 (27,4), 4 (27,5) e 5 (27,7) 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 de madeira (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 **influenciado** 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 bio redutor 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. **Estes resultados** 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 envolvido seja calculado e envolvido no valor do produto comercializado, pois trata-se de matéria prima de qualidade e de origem legalizada.

5.4 Conclusões

O estudo revelou que a carbonização em fornos de alvenaria de resíduos madeiros do manejo florestal previamente segregados apresentou maior qualidade do carvão vegetal produzido.

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 práticas.

A carbonização de madeiras não segregadas se mostrou muito variável, culminando na produção de carvões mais friáveis e **heterogêneos do ponto de vista físico, químico e energético**.

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 no **controle da taxa de aquecimento e** temperatura final.

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 8112**: carvão vegetal - análise imediata: método de ensaio, Rio de Janeiro, 1986.
- 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.
- 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.
- 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.

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 Agrária**, v. 14, n. 3, p. e5659, 2019a.

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. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.30, n.6, p.1023-1032, nov-dez., 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, 1982. p. 59 – 73.
- 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.
- 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.
- 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, 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, 2020.
- 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, 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.
- 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**

Biomass and Bioenergy (JCR 5,061/Qualis Capes Al)

Resumo

A segregação de biomassa residual do manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira já demonstrou efeitos positivos nos índices de produtividade e rendimento na carvoaria. Por outro lado, há carência de informações sobre a qualidade, combustibilidade e ocorrência de combustão espontânea em carvões produzidos em fornos de alvenaria. Esse estudo objetivou estudar a qualidade, combustibilidade e combustão espontânea dos carvões vegetais produzidos com madeiras residuais segregadas. Galhos de vinte espécies tropicais foram segregados em quatro grupos para a carbonização em fornos de alvenaria, sendo posteriormente comparado com a carbonização de madeiras não segregadas. Os carvões foram comparados quanto aos teores de materiais voláteis (TMV), carbono fixo (TCF) e

cinzas (TCz), poder calorífico superior (PCS), parâmetros de combustão, índices térmicos e ocorrência de autocombustão. Os carvões dos grupos 1 (1,20%), 3 (3,25%) e 4 (2,56%) tiveram os menores resultados de TCz. Os grupos 1 e 2 apresentaram valores de TCF (65,58 e 65,91%) e PCS (28,9 e 28,1 MJ kg⁻¹) mais acentuados do que os da carbonização sem segregação (TCF= 61,30% e PCS = 27,7 MJ kg⁻¹). Os grupos 1, 2 e 4 apresentaram as maiores temperaturas de ignição, temperaturas de burnout, temperaturas em que ocorre maior perda de massa e tempos de ignição. Por outro lado, o grupo 5 produziu carvões com baixa temperatura de ignição e baixa taxa máxima de combustão, além de, junto aos carvões do grupo 2 e 3, entraram em autocombustão. A segregação promoveu resultados positivos quanto a qualidade, combustibilidade e combustão espontânea de carvões vegetais produzidos em fornos de alvenaria.

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

6.1 Introdução

O carvão vegetal é obtido a partir da carbonização da madeira e é considerado 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, o que reforça o caráter renovável dessa matéria-prima.

Um problema enfrentado pelas indústrias que produzem ou utilizam o carvão vegetal é a ocorrência de combustão espontânea. Apesar de alguns estudos evidenciarem que o carvão vegetal não é acometido desse fenômeno (ROHDE, 2007; PEREIRA, 2017), a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2004) inclui o carvão vegetal na classe de material 4.2, que são os materiais sujeitos à autocombustão. Segundo a ANTT a autocombustão ou combustão espontânea é o acontecimento químico que ocorre a partir de reação de materiais combustíveis com o oxigênio, ocasionando uma lenta geração de calor, pelo qual os materiais elevam a sua temperatura, através de reações exotérmicas internas e atingem temperaturas maiores que a temperatura ambiente.

No Brasil, diversas biomassas são utilizadas para geração de energia, como resíduos florestais (LIMA et al., 2020a; LIMA et al., 2020b) e agrícolas (COSTA et al., 2020). O carvão vegetal é o único biocombustível classificado como produto sujeito a combustão espontânea (ANTT, 2004). Este fato está relacionado aos muitos incidentes que ocorrem em caminhões que transportam essa biomassa. No entanto, essa reigição do carvão vegetal tem sua origem principalmente no manejo não adequado do produto e quando não se tem o controle do **esfriamento** e efetua-se a descarga e transporte em temperaturas não seguras para esse fim. Assim, se esse carvão vegetal for acondicionado ainda quente no caminhão o carvão poderá entrar em ignição.

Neste cenário temos as indústrias siderúrgicas no estado do Pará, que ainda são abastecidas com carvão vegetal provenientes de resíduos de exploração florestal, que representa grande parte do carvão vegetal utilizado no estado. Não obstante, se faz necessário à avaliação se esta biomassa está sujeita à combustão espontânea. Para tanto, é **interessante** fazer o teste de combustão não espontânea e **associar** essa informação com a **análise** termogravimétrica e química imediata dos carvões vegetais de madeira residual do manejo florestal.

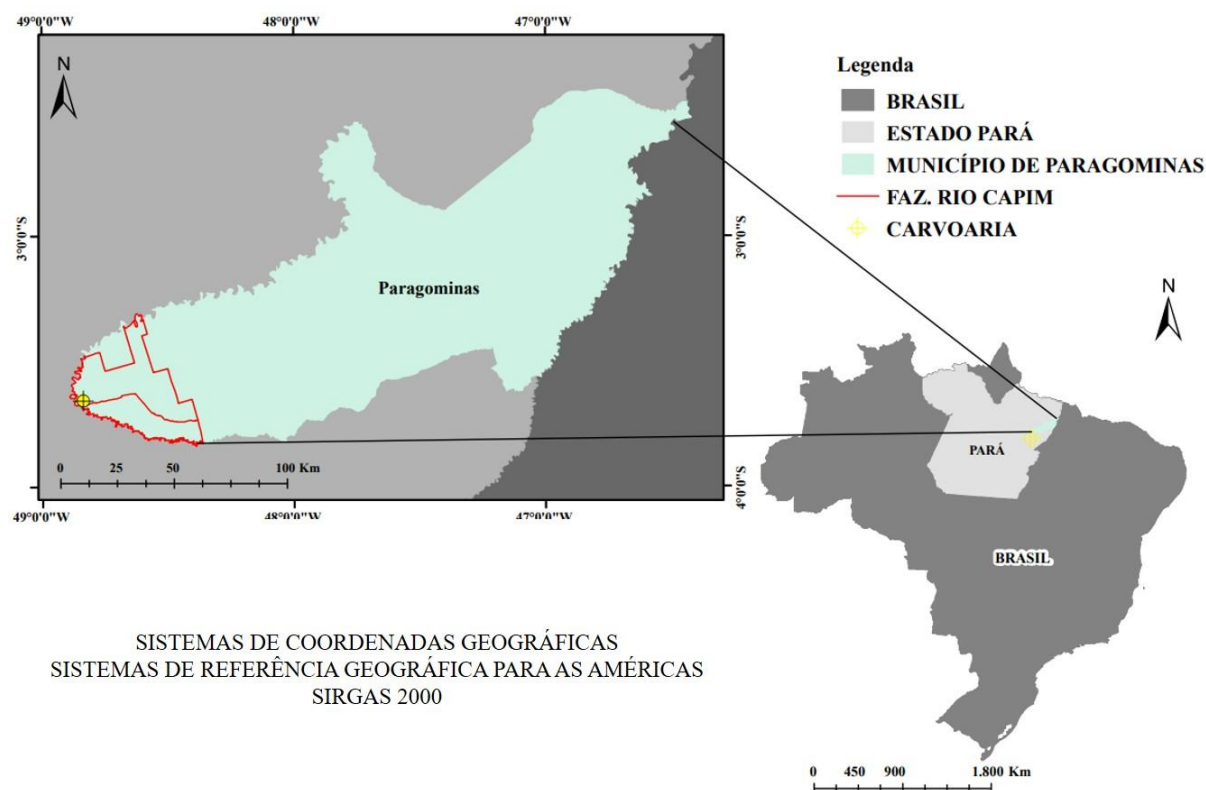
Os objetivos do trabalho foram: (i) Entender o processo de combustão dos carvões vegetais; (ii) Correlacionar os resultados dos testes de combustão com as propriedades físicas (granulometria e rachaduras) e químicas (percentuais de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo); e (ii) Verificar se o carvão 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 20).

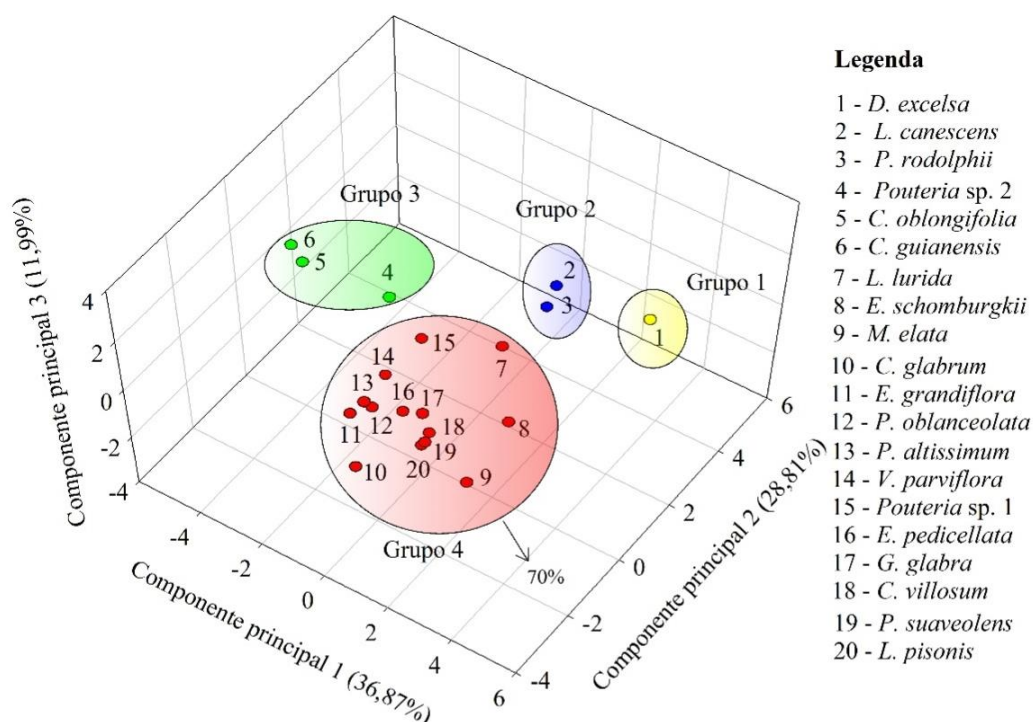
Figura 20 – Localização da carvoaria da Fazenda Rio Capim, localizada na cidade de Paragominas, Estado do Pará.



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 21) segregadas com base na 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 (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, que infere sobre a quantidade de lenha em volume necessária para a produção de 1 tonelada de carvão vegetal.

Figura 21 - 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 a retirada de corpos de prova com dimensões de 4 cm x 4 cm x 4 cm para a identificação botânica 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 carbonizados.

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
1	Anacardiaceae	<i>Anacardium giganteum</i> W.Hancock ex Engl.	Cajuaçu
2	Burseraceae	<i>Protium altissimum</i> (Aubl.) Marchand	Breu-barrote
3		<i>Protium</i> sp.	Breu-amesclim
4	Caryocaraceae	<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiarana
5		<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Piquiá
6	Chrysobalanaceae	<i>Licania canescens</i> Benoist	Casca-Seca
7		<i>Parinari rodolphii</i> Huber	Coco-pau
8	Goupiaceae	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba
9	Humiriaceae	<i>Vantanea guianensis</i> Aubl.	Uxirana
10	Lauraceae	<i>Ocotea</i> sp. 1	Louro-amarelo
11		<i>Ocotea</i> sp. 2	Louro-preto
12	Lecythidaceae	<i>Couratari oblongifolia</i> Ducke & Kunth	Tauari-branco
13		<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	Matamatá-branco
14		<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia
15		<i>Lecythis lurida</i> (Miers) S.A.Mori	Jarana
16	Leguminosae -Mimosoideae	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angelim-vermelho
17		<i>Parkia gigantocarpa</i> Ducke	Fava-atanã
18		<i>Pseudopiptadenia suaveolens</i> (Miq.) J.W.Grimes	Timborana
19		<i>Vatairea sericea</i> (Ducke) Ducke	Angelim-amargoso
20	Sapotaceae	<i>Manilkara elata</i> (Allemão ex Miq.) Monach.	Maçaranduba
21		<i>Pouteria</i> sp. 1	Abiorana
22		<i>Pouteria</i> sp. 2	Guajará-bolacha
23	Simaroubaceae	<i>Simarouba amara</i> Aubl.	Marupá

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 conjuntamente. Foram utilizados 4 fornos de alvenaria por grupo de madeira, totalizando 20 fornos, com ciclo de carbonização de 12 dias 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 retirada dos gases.

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. (ver sugestão anterior)

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. 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).

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

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

6.2.5 Análises térmicas dos carvões

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) e a análise térmica diferencial (DTA) foram as análises térmicas realizadas nos carvões de madeiras residuais da Amazônia. Essas análises foram realizadas no 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 ± 5% de oxigênio e 80 ± 5% de nitrogênio), com um fluxo de 100 mL.min⁻¹. Este procedimento foi semelhante ao adotado por Xiong et al. (2014) e Arauzo et al. (2020); contudo utilizaram temperaturas finais acima de 750°C, onde ocorre combustão (é isso mesmo?) dos minerais do carvão.

A curva termogravimétrica (TG) foi obtida para avaliar a perda de massa em função da temperatura e da curva da derivada primeira da perda de massa (DTG). As curvas termogravimétricas (TG) permitem o registro constante da perda de massa em função do tempo ou temperatura uma vez que a biomassa submetida a temperaturas crescentes geralmente há decréscimo na sua massa. Enquanto as curvas DTG correspondem à primeira derivada das curvas TG e apresentam a variação da massa em relação ao tempo, registradas em função da temperatura.

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, a saber, a etapa de secagem, combustão de materiais voláteis, combustão de carbono fixo, e formação de cinzas.

Com base na massa inicial de cada amostra, foram calculadas as perdas de massa, expressas em porcentagem, subtraindo-se do valor da massa final obtida nos seguintes intervalos de temperatura: 25-100°C, 100-200°C, 200-300°C, 300-400°C, 400-500°C, 500-600°C e 600-700°C. 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 ($T_{\max}$), a taxa máxima de combustão $[(dm/dt)_{\max}]$, a taxa média de combustão $[(dm/dt)_{\text{média}}]$ e o tempo de ignição foram os parâmetros da combustão avaliados. O índice característico da combustão (S), o índice de ignição (Di) e o índice de inflamabilidade (C_i) foram os índices calculados. Os índices de ignição e característico da combustão foram calculados por meio das Equações 2 e 3 (WANG, et al., 2011; MOON, et al., 2013). O índice de inflamabilidade foi determinado pela Equação 4 (ZOU, et al., 2019).

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

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

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

Onde: Di é o índice de ignição; S é o índice característico da combustão; C_i é o índice de inflamabilidade; $(dm/dt)_{\max}$ é a taxa máxima de combustão ($\% \text{ min}^{-1}$); $(dm/dt)_{\text{média}}$ é a taxa média de combustão; 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 não combustão espontânea dos carvões

Para os testes de não combustão espontânea 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 granulometria utilizada variou de $> 1,0$ cm e inferior à 4-5 cm. Estes materiais foram aquecidos a 140°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. (acho que deve ser mais detalhado este ensaio, o que é fundamental no ensaio?)

6.2.7 Análises estatísticas

As análises estatísticas consistiram de análise de variância (ANAVA) e teste 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 em 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 Qualidade do carvão vegetal dos resíduos de espécies tropicais

O teste de Scott-Knott promoveu a segregação dos resíduos em relação ao conteúdo de umidade (Ubs), materiais voláteis (TMV), cinzas (TCz), carbono fixo (TCF) e poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal. Variações importantes foram evidenciadas para a Ubs (6,07 – 8,87%), TMV (28,05 – 38,15%), TCz (1,20 – 6,03%), TCF (59,29 – 65,91%) e PCS (27,4 – 28,9 MJ kg⁻¹) (Tabela 4). O grupo 1 e 2 apresentaram os maiores valores médios de TCF, contudo o grupo 2 apresentou o maior valor de TCz médio. O grupo 5, corresponde aos carvões produzidos pela carbonização convencional, apresentou o segundo maior valor de TCz.

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

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

O teor de carbono fixo está abaixo do que se considera ideal para utilização siderúrgica, em torno de 75%. Este fato pode estar relacionado a composição química das madeiras de espécies nativas, que não apresentam melhoramento genético, e mais provavelmente ao modelo de carbonização de baixo nível tecnológico controlado de forma empírica (o que mais?). Como consequência, o nível de voláteis está acima da faixa indicada (20 – 25%) (SILVA; ATAÍDE, 2019). 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.

No presente estudo, todos os grupos de carvões estão com níveis de voláteis acima do recomendado para produção de carvão siderúrgico, contudo os grupos 1 (33,23%) e 2 (28,05%) apresentaram valores mais reduzidos.

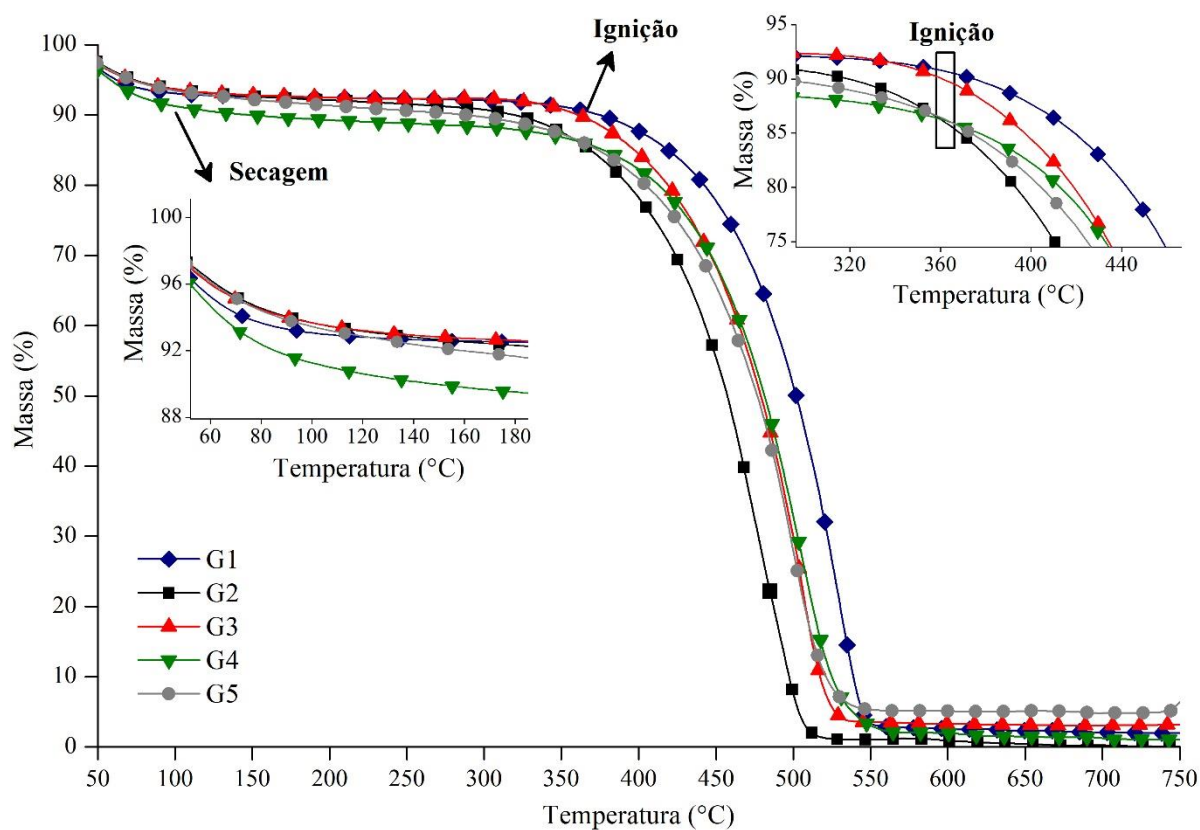
A literatura aponta que quanto maior o TCz do carvão, menor será o seu poder calorífico (AHMAD; SUBAWI, 2013). Além disso, carvões vegetais com maior concentração de cinzas podem promover incrustação e corrosão no equipamento de queima (VASSILEV et al., 2014). Dessa forma, a utilização de carvão vegetal oriundo dos grupos 2 e 5 pode culminar em manutenções mais frequentes no reator e reduzir a qualidade do ferro gusa, em virtude do fenômeno de segregação, que acumula minerais no centro do metal solidificado (LIMA et al., 2020b). Assim, o uso de carvões vegetais dos grupos 1, 3 e 4 na indústria siderúrgica pode melhorar a qualidade do ferro gusa produzido.

O poder calorífico superior representa a energia liberada no processo de combustão. Dessa forma, carvões com maiores valores de PCS são mais alvejados para finalidades industriais. No presente estudo, os grupos 1 e 2 se destacaram com os valores mais elevados devido ao maior quantitativo de carbono fixo. Embora o grupo 2 tenha apresentado maior conteúdo de cinzas, destaca-se a necessidade de se estudar a viabilidade do uso desses carvões dentro de altos-fornos siderúrgicos, pois apesar de liberar maior quantidade de energia pode culminar em manutenções periódicas nos reatores e outros inconvenientes associados a redução do minério de ferro.

6.3.2 Perfil térmico dos carvões vegetais

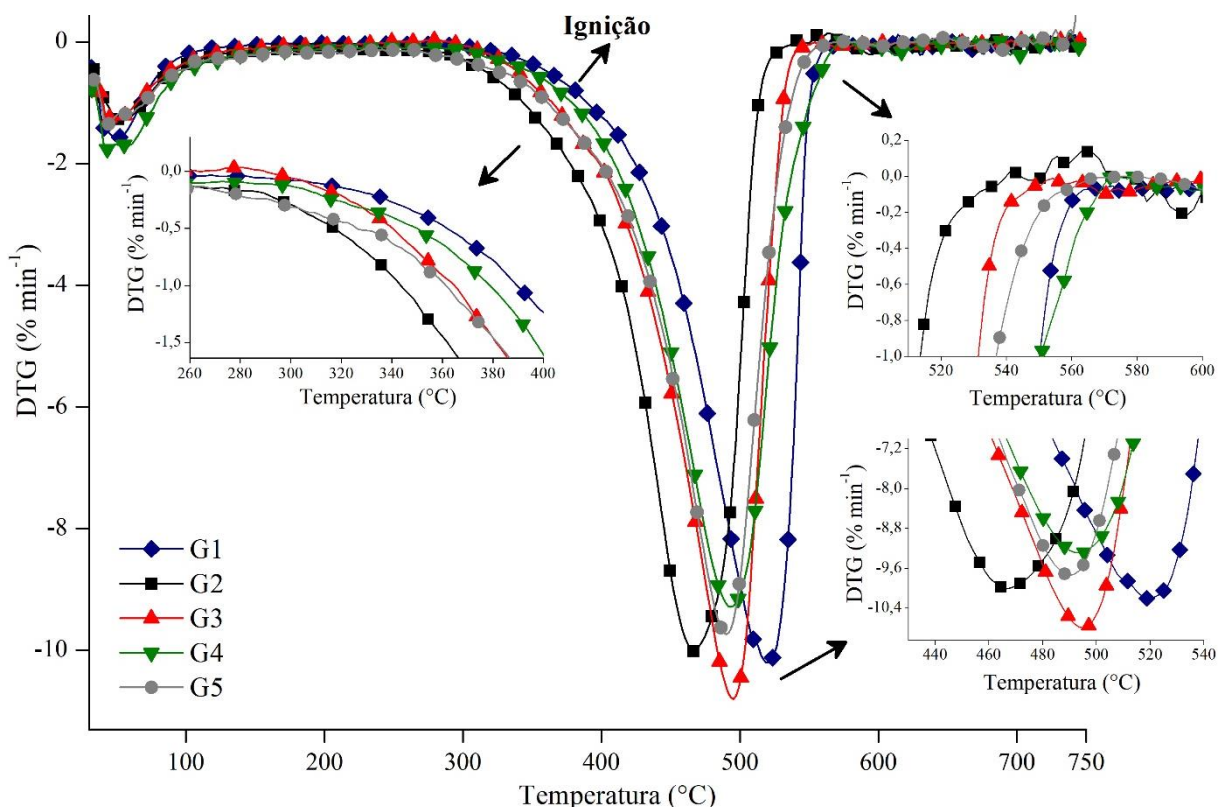
O comportamento da combustão dos carvões vegetais dos grupos de espécies simulado por meio de curvas TGA é evidenciado na Figura 22. A ordem decrescente dos grupos de espécies com maior estabilidade térmica durante a combustão é: 1, 3, 4, 5 e 2. Os carvões vegetais dos grupos mais estáveis termicamente (1, 3 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 22 – Curvas termogravimétricas dos carvões de grupos de espécies produzidos em fornos de alvenaria.



A Figura 23 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 23 - 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 5). 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 5 - Perda de massa dos carvões vegetais em porcentagem por faixas de temperaturas durante o processo de combustão.

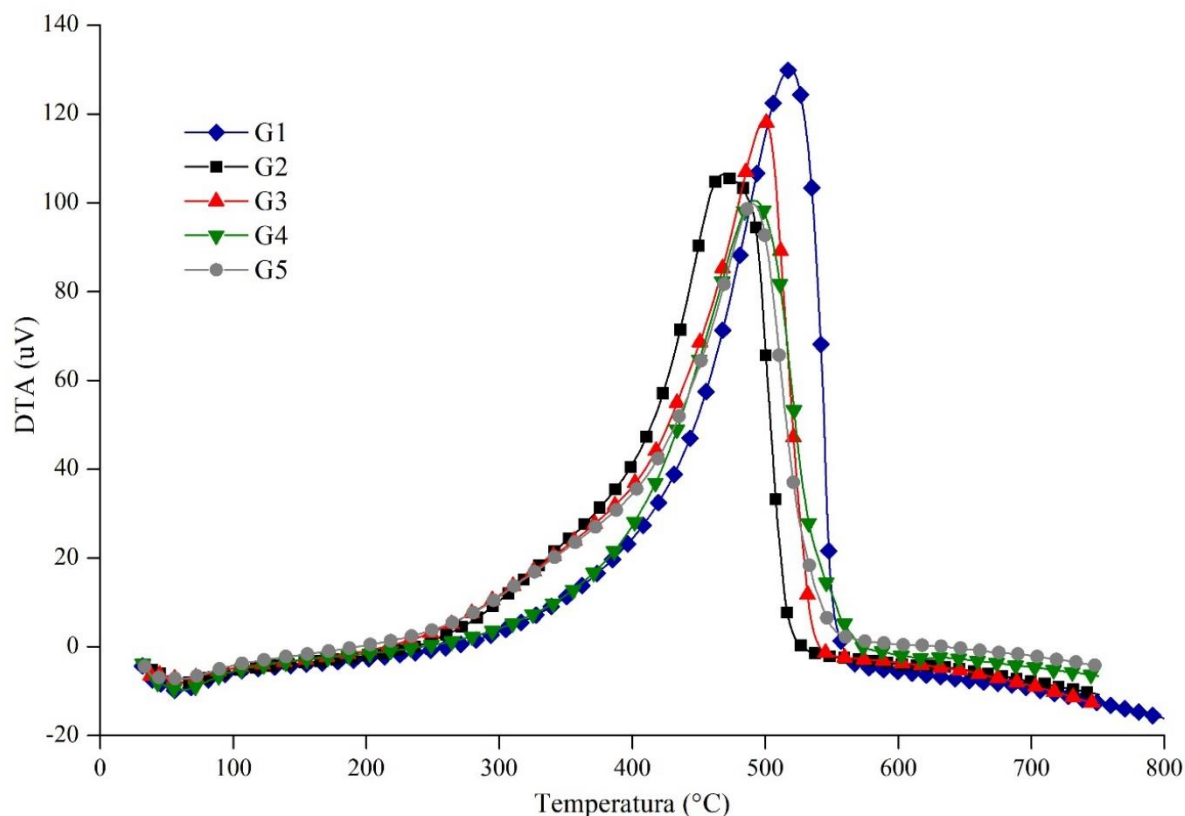
Grupo	Faixa de temperatura (°C)							Massa residual (%)
	25-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	
1	7,42 $\pm$ 0,85	1,12 $\pm$ 0,83	0,66 $\pm$ 0,93	5,51 $\pm$ 1,96	38,58 $\pm$ 4,10	44,97 $\pm$ 2,12	0,16 $\pm$ 2,12	1,57
2	5,66 $\pm$ 0,15	1,31 $\pm$ 0,49	0,44 $\pm$ 0,95	7,37 $\pm$ 3,06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

Média $\pm$ 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 24, que **mostra** 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 2 apresentou o maior pico de liberação de energia próximo a 450°C.

Figura 24 – Análise térmica diferencial da combustão dos grupos de carvões vegetais.



Com base nos dados de DTG e DTA, a maior perda de massa ocorreu 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 é queimado de forma mais intensa, liberando mais calor. Devido apresentar maior conteúdo de carbono fixo, o grupo 1 apresentou maior pico de liberação de energia, acima de 500°C. Acredita-se que a menor temperatura de liberação de máxima energia para o grupo 2 está relacionada ao conteúdo de cinzas desses carvões, que reduziu o poder calorífico e a energia térmica liberada pela queima.

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** na Tabela 6. Todos esses parâmetros foram influenciados significativamente pelo fator grupo, conforme o teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$).

Tabela 6 - Parâmetros da combustão dos grupos de carvões vegetais.

Grupo	T_i (°C)	T_b (°C)	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	$(dm/dt)_{max}$ (% min ⁻¹)	$(dm/dt)_{m\acute{e}dia}$ (% min ⁻¹)	t_{ig} (min)
1	379,72 ^{±7,79} a	547,23 ^{±3,15} a	515,43 ^{±3,49} a	10,57 ^{±0,34} a	1,32 ^{±0,07} b	33,39 ^{±0,84} a

2	365,98 $\pm$ 2,09 b	533,15 $\pm$ 3,89 b	494,02 $\pm$ 3,81 b	10,58 $\pm$ 0,16 a	1,34 $\pm$ 0,02 b	31,86 $\pm$ 0,29 b
3	346,77 $\pm$ 8,49 c	523,62 $\pm$ 6,76 c	471,13 $\pm$ 11,09 c	9,72 $\pm$ 0,52 b	1,39 $\pm$ 0,01 a	30,10 $\pm$ 0,75 c
4	367,67 $\pm$ 11,30 b	545,15 $\pm$ 3,46 a	499,32 $\pm$ 4,18 b	10,38 $\pm$ 0,75 a	1,38 $\pm$ 0,01 a	32,26 $\pm$ 0,70 b
5	361,65 $\pm$ 4,91 b	538,43 $\pm$ 7,69 a	489,78 $\pm$ 3,59 b	9,54 $\pm$ 0,37 b	1,34 $\pm$ 0,02 b	31,72 $\pm$ 0,63 b

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

Em condições industriais, os grupos 1, 2 e 4 permanecerão por mais tempo no reator devido apresentarem as maiores médias para a temperatura de ignição, temperatura de burnout, temperatura em que ocorre maior perda de **massa**, e tempo de ignição. Biocombustíveis com altas temperaturas finais de combustão apresentam tempo de combustão mais longo. Os carvões vegetais dos grupos 3 e 5 apresentam maior facilidade de queima devido aos conteúdos elevados de materiais voláteis, consequentemente, esses grupos apresentam as menores temperaturas de ignição (LEROY et al., 2006). A literatura demonstra que o maior teor de materiais voláteis favorece a ignição dos biocombustíveis (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 e 2 e pode ser explicada pelos maiores valores de poder calorífico superior reportados para esses grupos (ver Tabela 4). A taxa média de combustão foi maior para os grupos 3 e 4 e pode ser justificada pelos baixos valores de cinzas reportados para esses carvões (PROTÁSIO et al., 2014).

Não houve efeito significativo de grupo sob os índices de combustão e inflamabilidade. Por outro lado, o fator grupo influenciou o 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 (**Tabela 7**). 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).

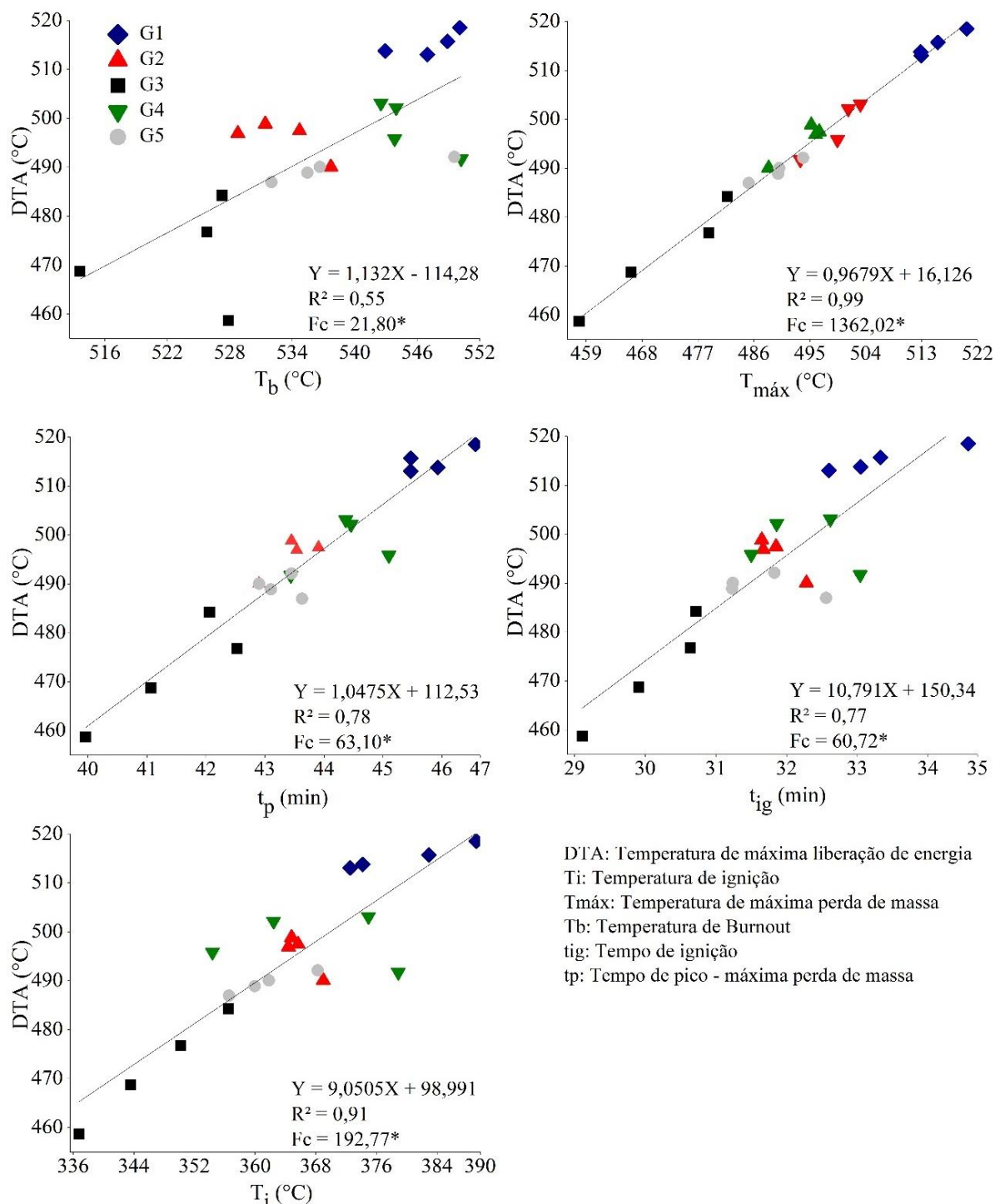
Tabela 7 - Índices da combustão dos grupos de carvões vegetais.

Grupo	$S \times 10^7 \%^2 / (\text{min}^2 \text{C}^3)$	$Ci \times 10^4 \% \text{ min}^{-1} / \text{C}^2$	$Di \times 10^3 (\% \text{ min}^{-3})$
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 (DTA), temperatura de burnout (T_b), temperatura de máxima perda de massa ($T_{\text{máx}}$), tempo de pico – máxima perda de massa (t_p), temperatura de ignição (T_i) e tempo de ignição (t_{ig}) (Figura 25). Como os grupos 1, 2 e 4 apresentaram as maiores temperaturas de máxima liberação de energia (ver Tabela 6), consequentemente, 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 os grupos 3 e 5 apresentaram as menores temperaturas de máxima liberação de energia.

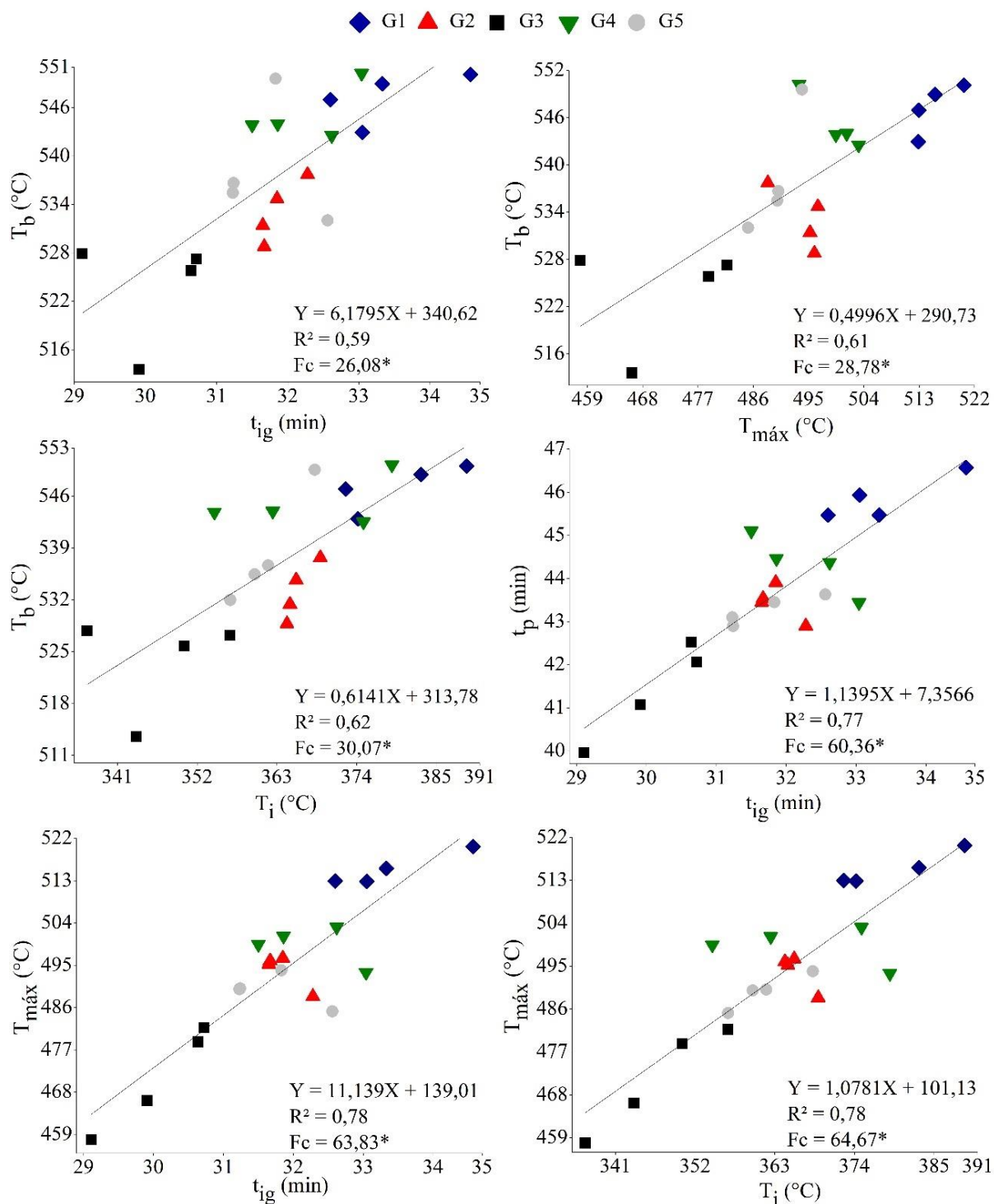
Figura 25 – Relações entre a temperatura de máxima liberação de energia (DTA) e temperatura de burnout (T_b), temperatura de máxima perda de massa ($T_{\text{máx}}$), tempo de pico – máxima perda de massa (t_p), temperatura de ignição (T_i) e tempo de ignição (t_{ig}).



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 26). 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 26 – 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.

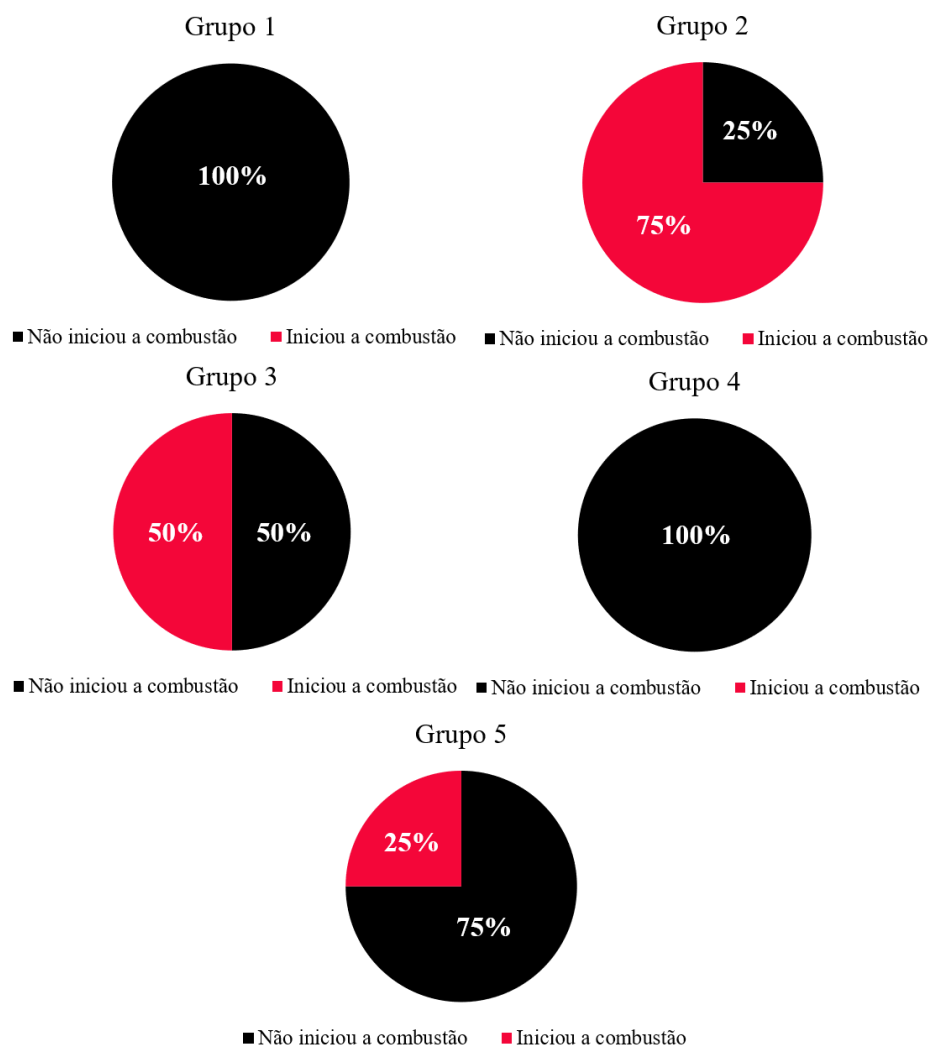


6.3.3 Autocombustão do carvão vegetal

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 27). Por

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

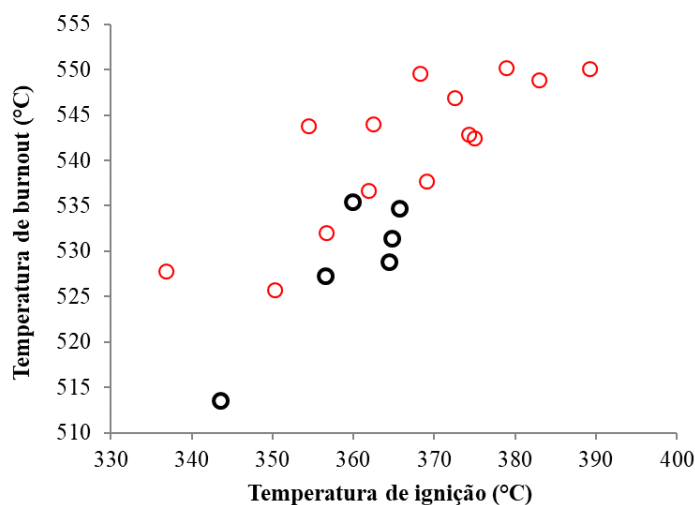
Figura 27 - Análise da combustão espontânea de carvões vegetais de grupos de espécies carbonizadas em fornos de alvenaria.



Os carvões dos grupos 2, 3 e 5 podem ser classificados na classe 2 da resolução 420 da Agência Nacional de Transportes Terrestres. A classe 2 representa produtos com risco de sofrer combustão espontânea. Entende-se que a segregação e as recomendações realizadas nesse estudo podem reduzir os incidentes associados à queima do carvão e auxiliar no melhor transporte nas rodovias do Brasil.

Nesse estudo, os carvões que sofreram autocombustão também apresentaram baixas temperaturas de ignição e de burnout (Figura 28).

Figura 28 – 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 **atuar** como catalisadores, facilitando a ignição do carvão vegetal. Carvões com óxidos minerais do tipo CuO , Fe_2O_3 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 madeiros 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 o 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 positivamente a qualidade, os índices de combustibilidade e a autocombustão do carvão vegetal.

Os carvões vegetais dos grupos 1, 3 e 4 foram considerados mais estáveis termicamente devido ao menor teor de cinzas e maior teor de materiais voláteis. (ver isso melhor, pois o grupo 1 possui menos cinzas e mais carbono fixo)

A análise térmica diferencial permitiu a identificação de duas fases de liberação de energia para carvões de resíduos da Amazônia. 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 5, representando a carbonização tradicional sem segregação, produziu carvões com baixa temperatura de ignição e baixa taxa máxima de combustão.

Os carvões dos grupos 2, 3 e 5 podem ser classificados na classe 2 (produtos com risco de sofrer combustão espontânea) da resolução 420 da Agência Nacional de Transportes Terrestres.

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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 2020**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.
- 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.
- NOGUEIRA, L. A. H; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2 ed. Interciencia, Rio de Janeiro, 2003. 199 p.
- 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.
- MASSUQUE, J.; SOUSA, K. I. R.; TRUGILHO, P. F. Effect of fiber and vessel biometry on Miombo native species wood combustibility. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, 2021.
- PEREIRA, M. P. C. F. **Decomposição térmica e biológica de cavacos de *Eucalyptus urophylla***. 2017. 63 p. Dissertação (mestrado em ciências florestais) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2017.
- ROHDE, G. M. O mito da combustão espontânea do carvão vegetal. **Revista da madeira**. Ed. n. 106, 2007. Disponível em: http://www.remade.com.br/artigos-tecnicos?id=52&categoria=energia&subcategoria=carvao-vegetal&ArtigosTecnicos_page=12. Acesso em: 15 nov 2021.
- 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.
- 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.
- 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.
- R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.
- SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: product yields and characterization. **Energy**, v. 172, 509–516, 2019.
- VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G.; BAXTER, D. Trace element concentrations and associations in some biomass ashes. **Fuel**, v. 129, p. 292–313, 2014.
- 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.
- 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, especialmente galhos, no pátio de estocagem das carvoarias se mostrou promissora para a produção de carvão vegetal na Amazônia Brasileira.

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. Por outro lado, 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 o 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.