



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

JEYMMY RAYENA ALVES OLIVEIRA

**QUALIDADE DO CARVÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS PRODUZIDO EM
FORNO METÁLICO COM INJEÇÃO DE GASES QUENTES PARA USO
INDUSTRIAL**

BELÉM

2025

JEYMMY RAYENA ALVES OLIVEIRA

**QUALIDADE DO CARVÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS PRODUZIDO EM
FORNO METÁLICO COM INJEÇÃO DE GASES QUENTES PARA USO
INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), como requisito para obtenção do título de mestre em Ciência Florestais.

Orientadora: Dr^a. Marcela Gomes da Silva

BELÉM

2025

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

- O48q Oliveira, Jeymy Rayena Alves
Qualidade do Carvão de Resíduos Florestais Produzido em Forno Metálico com Injeção de Gases Quentes para Uso Industrial / Jeymy Rayena Alves Oliveira. - 2025.
63 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2025.
Orientador: Profa. Dra. Marcela Gomes da Silva
1. Biorredutor. 2. Densidade. 3. Rendimento. 4. Potencial Energético. 5. Amazônia. I. Silva, Marcela Gomes da, *orient.* II. Título

JEYMMY RAYANA ALVES OLIVEIRA

**QUALIDADE DO CARVÃO DE RESÍDUOS FLORESTAIS PRODUZIDO EM
FORNO METÁLICO COM INJEÇÃO DE GASES QUENTES PARA USO
INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em ciências Florestal da Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Data da Aprovação: 07/01/2025

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente



MARCELA GOMES DA SILVA

Data: 13/01/2025 15:36:48-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Marcela Gomes da Silva – Orientadora
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Documento assinado digitalmente



ANTONIO JOSE VINHA ZANUNCIO

Data: 13/01/2025 20:46:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio José Vinha Zanuncio 1º Examinador
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Documento assinado digitalmente



JOAO RODRIGO COIMBRA NOBRE

Data: 13/01/2025 15:25:04-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. João Rodrigo Coimbra Nobre – 2º Examinador
Universidade do Estado do Pará – UEPA

Documento assinado digitalmente



ELESANDRA DA SILVA ARAUJO

Data: 13/01/2025 11:55:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr^a. Elesandra da Silva Araujo – 3º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela fé e força de vontade de lutar todos os dias pelos meus sonhos, me guiando e me mantendo firme por toda essa caminhada.

Aos meus familiares, aos meus pais Raimundo Oliveira e Jerusa Oliveira, obrigada por toda dedicação e ensinamentos, por todo apoio. A minha irmã Jenniffer Oliveira, obrigada por todo apoio e incentivo e a cada palavra para que continuasse nessa caminhada.

A todos os professores que contribuíram para minha caminhada e crescimento dentro da universidade, em especial a professor Sueo Numazawa pelas orientações e ensinamentos, os quais foram fundamentais para a realização deste estudo e que sem dúvida contribuíram para meu crescimento profissional. A minha orientadora professora Marcela Gomes, por todo apoio e orientações para concluir esse trabalho.

Aos meus amigos, Jonathan Lemos e Luís Otavio, obrigada pelo apoio, ensinamentos e auxílio em diversos trabalhos durante a graduação, sem vocês a caminhada seria mais difícil.

“Não temas, pois eu sou contigo.

Não tenha medo, eu sou o teu Deus.

Eu o fortalecerei e o ajudarei,

Eu o segurarei com minha mão vitoriosa.”

(Isaías 41:10)

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS	9
2.1. Objetivo geral	9
2.2. Objetivos específicos.....	9
3. QUESTÕES CIENTÍFICAS E HIPÓTESES	10
3.1. Questões científicas	10
3.2. Hipóteses	10
4. PREMISSA DO PROJETO.....	10
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
5.1. Produção de carvão vegetal no Brasil	10
5.2. Processo de carbonização.....	12
5.3. Forno metálico de carbonização	13
5.4. Resíduos de manejo florestal	15
5.5. Propriedades físicas da madeira e do carvão vegetal	15
5.5.1. Umidade	15
5.5.2. Densidade básica e aparente	16
5.5.3. Densidade à granel do carvão	17
5.6. Características químicas do carvão	17
5.6.1. Teor de materiais voláteis	17
5.6.2. Teor de cinzas	18
5.6.3. Teor de carbono fixo	18
5.6.4. Poder calorífico.....	19
6. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
6.1. Local de estudo	20
6.2. Seleção e caracterização dos resíduos florestais para carbonização	21
6.3. Características físicas dos resíduos	22
6.3.1. Densidade aparente.....	22
6.3.2. Teor de Umidade	23

6.4. Carbonização em forno metálico com injeção de gases quentes	24
6.5. Avaliação quantitativa do processo de carbonização	25
6.6. Avaliação qualitativa do carvão vegetal.....	27
6.6.1. Características físicas do carvão	27
6.6.2. Características química do carvão	29
6.6.3. Caraterística energética do carvão	31
6.6.4. Característica mecânica do carvão	31
6.7. Análises estatísticas	32
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
7.1 Teor de umidade da madeira	32
7.2 Densidade básica da madeira (Db)	34
7.3 Densidade aparente da madeira (DAp)	35
8. Características físicas do carvão	37
8.1 Teor de Umidade	37
8.2. Densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRAp)	38
8.3 Densidade à granel do carvão (DG)	39
9. Características químicas do carvão	41
9.1 Teor de materiais voláteis (TMV)	41
9.2 Teor de cinzas (TCi).....	42
9.3 Teor de carbono fixo (TCF)	44
10. Característica energética do carvão	45
11. Característica mecânica de Friabilidade	47
12. Avaliação quantitativa do processo de carbonização	49
13. CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	53

RESUMO

Os fornos metálicos têm sido aperfeiçoados para melhorar os métodos tradicionais de produção de carvão vegetal, visando reduzir o tempo de carbonização, aumentar os rendimentos e otimizar o aproveitamento dos subprodutos. A pesquisa objetivou avaliar a conversão de resíduos de exploração gerados em manejo florestal e as características quantitativas e qualitativas do carvão vegetal produzido em um protótipo de forno metálico, produzido na Unidade Produtora de Carvão Vegetal da Fazenda Rio Capim, pertencente ao Grupo KEILLA, no Município de Paragominas-PA. Para aferir as variações de densidade dos resíduos estudados foram realizadas coletas de madeira com diferentes densidades básica (baixa, média, alta), preparando-se dez corpos de prova para cada uma dessas classificações, totalizando trinta corpos de prova por fornada. Foram realizadas cinco carbonizações com resíduos com diferentes espécies dentro do forno. As amostras de carvão produzido foram enviadas ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais – LTPF/ICA/UFRA para realização das análises qualitativas, referentes às propriedades físicas, (umidade, densidade básica e densidade à granel); químicas (teor de voláteis, cinza, carbono fixo), energéticas (poder calorífico superior, inferior e útil) e mecânica (friabilidade) do carvão. Os teores de umidade do carvão vegetal variaram de 4,29% a 5,07%. A densidade aparente foi de 0,330 g/cm³ (baixa densidade), 0,507 g/cm³ (média) e 0,686 g/cm³ (alta). O teor de materiais voláteis (TMV) ficou entre 27,42% e 28,29%, enquanto o teor de cinzas (TCi) foi maior em carvões vegetais de densidade média (1,62%), seguido pelos de baixa (1,59%) e alta densidade (1,40%). O teor de carbono fixo (TCF) foi similar entre os grupos cerca de 70%. O poder calorífico superior (PCS) variou pouco, com médias entre 29.257,72 kJ/kg e 29.339,26 kJ/kg. O rendimento gravimétrico foi de 31,2%, volumétrico de 37,6%, e a conversão volumétrica e gravimétrica foi respectivamente de 1,441 m³/mdc e 3,2 t/t. Os resultados apresentados são compatíveis a outros estudos encontrados em literaturas pertinentes. O carvão vegetal produzido em forno metálico com injeção de gases quentes indicou que as características físicas concernentes a teor de umidade e densidade da madeira, influenciaram significativamente a carbonização. A tecnologia do forno metálico tornou mais eficiente a distribuição de energia no interior do forno, reduzindo o tempo de carbonização.

Palavras-chave: Biorredutor, densidade, rendimento, potencial energético, Amazônia.

Abstract

Metal furnaces have been improved to improve traditional methods of charcoal production, aiming to reduce carbonization time, increase yields and optimize the use of by-products. The research aimed to evaluate the conversion of exploration residues generated in forest management and the quantitative and qualitative characteristics of charcoal produced in a prototype metal furnace, produced at the Charcoal Production Unit of Fazenda Rio Capim, belonging to the KEILLA Group, in the municipality of Paragominas-PA. To measure the density variations of the studied residues, wood with different densities (low, medium, high) was collected, preparing ten test specimens for each of these classifications, totaling thirty test specimens per batch. Five carbonizations were carried out with residues with different species inside the furnace. The samples of charcoal produced were sent to the Laboratory of Forest Products Technology - LTPF/ICA/UFRA for qualitative analyses, referring to the physical characteristics, (moisture, basic density and bulk density); chemical (volatile content, ash, fixed carbon), energetic (higher, lower and useful calorific value) and mechanical (friability) properties of the coal. The moisture content of the charcoal ranged from 4.29% to 5.07%. The apparent density was 0.330 g/cm³ (low density), 0.507 g/cm³ (medium) and 0.686 g/cm³ (high). The volatile material content (TMV) was between 27.42% and 28.29%, while the ash content (TCi) was higher in medium density charcoals (1.62%), followed by low (1.59%) and high density (1.40%). The fixed carbon content (TCF) was similar between the groups around 70%. The gross calorific value (SVC) varied little, with averages between 29,257.72 kJ/kg and 29,339.26 kJ/kg. The gravimetric yield was 31.2%, the volumetric yield was 37.6%, and the volumetric and gravimetric conversions were 1.441 m³/mdc and 3.2 t/t, respectively. The results presented are consistent with other studies found in relevant literature. The charcoal produced in a metal furnace with hot gas injection indicated that the physical characteristics concerning moisture content and wood density significantly influenced carbonization. The metal furnace technology made the distribution of energy inside the furnace more efficient, reducing carbonization time.

Keywords: Bioreducer, density, yield, energy potential, Amazon.

1. INTRODUÇÃO

A biomassa, é conhecida pelas suas propriedades quase neutras em carbono e abundância na natureza, oferecendo a oportunidade de diminuir o consumo de combustíveis fósseis, poluição ambiental e emissões de gases com efeito de estufa (Wang et al., 2018). A biomassa florestal utilizada nos processos de carbonização é proveniente de plantios florestais, árvores mortas por perturbações, resíduos da colheita (casca, galhos e folhas), desbastes, podas e do processamento industrial (Ferreira et al., 2018). Uma opção atraente para atender à crescente demanda por energia se tornando uma alternativa promissora.

A carbonização é o processo de aumento do teor de carbono fixo no carvão por meio de tratamento térmico, envolvendo transformações físicas e químicas (Benites; Pimenta, 2014). O Brasil é o principal país que utiliza carvão vegetal em escala industrial como substituto do carvão mineral na produção de ferro-gusa e aço (Rodrigues et al., 2019). Estima-se que, até 2024, a produção de carvão vegetal no Brasil gere cerca de 2 bilhões de dólares em receitas (PS Market Research, 2020).

Atualmente, o Brasil ocupa a posição de liderança no cenário global em termos de produção e consumo de carvão vegetal. Em 2022, o país produziu 7,0 milhões de toneladas, com quase toda a produção voltada para o mercado interno (Indústria Brasileira de Árvores, 2023). Essa significativa produção reflete a demanda do setor industrial, especificamente da indústria, que consome 83,1% de carvão vegetal produzido para a redução do minério de ferro. A menor fração, correspondente a aproximadamente 10,2% da produção total, é destinada para geração de energia e calor em residências (Anuário Estatístico de Energia Elétrica, 2021).

De acordo com informações do (Sindicado da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2023), o setor de Siderurgia e Aço produziu 7,8 milhões de toneladas de ferro-gusa utilizando carvão vegetal como biorredutor em 2022, correspondendo apenas 24,1% da sua produção total originada de carvão vegetal. O polo siderúrgico de Carajás, localizado na Amazônia Brasileira, especificamente no estado do Pará e parte do Maranhão. É o segundo maior polo do Brasil, tendo sido responsável por 12% da produção nacional de ferro-gusa em 2020 e Minas Gerais, com uma expressiva participação de 73,2%, lidera a produção no país (Sindicado da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2023).

No norte da Amazônia, a exploração madeireira, gera elevada quantidade de resíduos no país, no entanto, esses resíduos são aproveitados para garantir a qualidade dos serviços na produção de carvão vegetal e na fonte de energia elétrica (Rodrigues, 2018). A demanda de

carvão nos pólos sidero-metalúrgicos do Pará e do Maranhão força a busca de alternativas que permitam melhores condições de trabalho, utilização eficiente de biomassa disponível e a possibilidade de se alcançar o melhor desempenho tecnológico para garantir o desenvolvimento sustentável dos setores envolvidos na cadeia de produção e de consumo de carvão vegetal.

As carbonizações na Amazônia têm sido realizadas em fornos rudimentares e conduzidas com base na experiência dos trabalhadores, considerando a cor e o fluxo da fumaça e a temperatura da parede do forno percebida pelo tato como critérios de decisão (Pereira et al., 2020). Os fornos possuem variadas dimensões e forma, com pequenas aberturas chamadas baianas, o qual servem como saídas de fumaça e para controle da cor da fumaça para avaliar a evolução da carbonização, no entanto, possuem pequena vida útil (2 a 4 anos), tornando-se necessária a reconstrução.

A tecnologia utilizada na produção de carvão vegetal exerce impacto direto na qualidade do produto, rendimento do processo produtivo e na redução de resíduos de plano de manejo florestal. No entanto, ainda faltam estudos voltados para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias de fornos para essa finalidade. O desenvolvimento desses fornos costuma seguir uma abordagem experimental, onde os designers criam protótipos que aprimorados conforme o desempenho observado durante a produção de carvão (Rodrigues et al., 2023).

Diversos estudos investigaram diferentes tipos de fornos, incluindo fornos de contêiner, fornos circulares verticais metálicos, retangulares, fornos cilíndricos, de tambor, industriais de metal, tradicionais circulares e de alvenaria com controle de temperatura (Arruda et al., 2011; Vilela et al., 2014; Charvet et al., 2022; Sangsuk et al., 2020; García-Quezada et al., 2023). A maior parte dessas pesquisas foca no desempenho dos fornos, como eficiência e rendimento, sem detalhar a qualidade do carvão produzido e no processo de desenvolvimento das tecnologias envolvidas.

A sustentabilidade do setor de carvão vegetal depende do desenvolvimento de tecnologias inovadoras que conciliem eficiência, qualidade e redução de impacto ambiental. Na tentativa de melhorar os métodos tradicionais de produção do carvão vegetal, os fornos metálicos vêm sendo utilizados e aperfeiçoados visando o alcance de resultados em termos de redução do tempo de carbonização, aumento nos rendimentos, aproveitamento dos subprodutos do processo e diminuição dos custos logísticos (Donato et al., 2017).

Esses fornos apresentam elevado rendimento e produzem um carvão com qualidade química/energética mais homogênea em comparação aos fornos de alvenaria, além de contarem com combustão interna parcial, sistema integrado e logística otimizada, sem contaminação do carvão com terra ou outros agentes (Centro de Gestão Estudos Estratégicos, 2015). No entanto,

suas principais desvantagens incluem a ausência de plantas operando em larga escala ou mesmo em uma escala mínima que torne o custo-benefício competitivo com os métodos tradicionais. Além disso, a tecnologia ainda não está consolidada no mercado, gerando incertezas em outras indústrias quanto à viabilidade de implantação de um projeto que ainda está em desenvolvimento (Rodrigues et al., 2019).

Para isso, este estudo poderá promover pelo menos diretamente três benefícios: (1) Tecnológica: forno com maior durabilidade e melhoria na produção do carvão; (2) Social: melhoria das condições de trabalho; e (3) Econômica: com a redução do ciclo de carbonização, promover-se-á uma maior produtividade na fabricação de carvão.

Portanto, o estudo sobre um protótipo de forno metálico fixo de carbonização se desponta como inovadora e vem preencher a lacuna ainda existente de tecnologia por meio da avaliação do desempenho do forno com injeção de gases quentes na carbonização de resíduos de exploração gerados em manejo florestal, mais adequada e duradoura com a possibilidade de ganhos em rendimento, qualidade do carvão produzido. O forno possibilita maior eficiência na transferência de energia dentro do forno, resultando em melhor performance da carbonização e melhorias na condição de trabalho e de vida das pessoas que estão envolvidas no processo de fabricação de carvão vegetal, além de ser ambientalmente correto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a conversão de resíduos de exploração gerados em manejo florestal e as características quantitativas e qualitativas do carvão vegetal produzido em um protótipo de forno metálico.

2.2. Objetivos específicos

- 2.2.1. Realizar rodadas de carbonização com resíduos de exploração procedentes de Plano de Manejo Florestal Sustentável.
- 2.2.2. Avaliar a produtividade do forno metálico sob o aspecto de coeficiente de conversão volumétrica e gravimétrica de resíduos de exploração florestal, em carvão.
- 2.2.3. Determinar o coeficiente de rendimento gravimétrico de carvão produzido com resíduos de exploração florestal.

2.2.4. Realizar estudos qualitativos referentes às propriedades físicas, químicas, energéticas e mecânica do carvão.

3. QUESTÕES CIENTÍFICAS E HIPÓTESES

3.1. Questões científicas

A nova tecnologia poderá promover melhorias e maior produção de carvão?

O forno metálico fixo com injeção de gases quentes pode proporcionar maior eficácia de carbonização devido a rapidez de transferência de calor no interior do forno?

3.2. Hipóteses

Hipótese 1: A injeção de gases quentes no forno promove um rápido aquecimento interno do forno, possibilitando a redução do ciclo de carbonização.

Hipótese 2: Devido a eficácia e rapidez de distribuição do calor no interior do forno, a conversão pirolítica se torna mais homogênea, melhorando as características qualitativas do carvão.

4. PREMISSA DO PROJETO

A premissa capital que se levanta para justificar este projeto está alicerçada em:

A tecnologia de forno metálico com injeção de gases quentes aumenta a produtividade do processo de fabricação de carvão de resíduos de exploração florestal, devido a rapidez na distribuição de calor no interior do forno, promovendo um ciclo mais curto de carbonização.

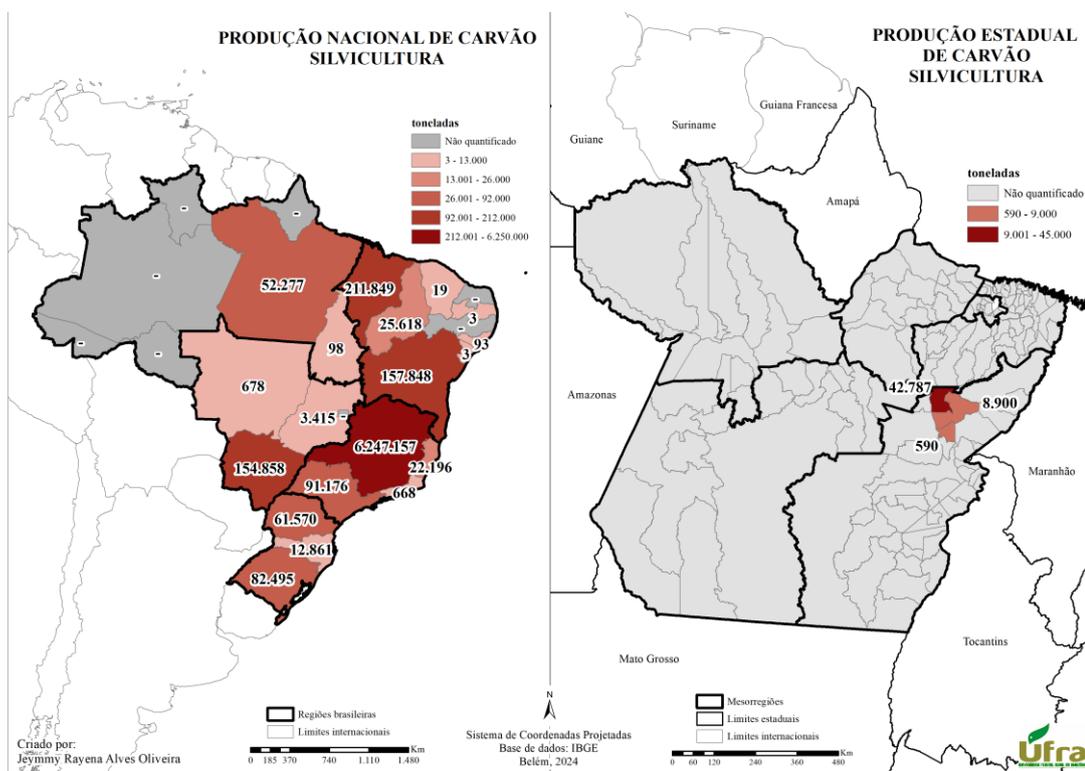
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1. Produção de carvão vegetal no Brasil

A produção de carvão vegetal no Brasil tem como principais destinos o uso como fonte de energia, especialmente na indústria siderúrgica e metalúrgica, onde é utilizado em conjunto com o carvão mineral, além de ser empregado no uso doméstico, como fonte de calor para cozinhar alimentos. A matéria-prima para a produção desse carvão é variada, podendo vir de diferentes partes da árvore ou de resíduos de seu processamento. Isso inclui árvores antigas abatidas, árvores que morreram devido a distúrbios, resíduos de desbaste, podas, resíduos de exploração florestal, subprodutos da silvicultura e florestas energéticas (Ferreira et al., 2018).

Cerca de 6,9 milhões de toneladas de carvão vegetal foram produzidas a partir de florestas plantadas, representando um aumento de 15% nos últimos cinco anos (Indústria Brasileira de Árvores, 2023). Minas Gerais lidera a produção florestal no país, com um crescimento de 2,6%, alcançando R\$ 7,5 bilhões em 2022, o que corresponde a 27,3% do total nacional (Figura 1). O estado também se destaca na produção de carvão vegetal, sendo responsável por 87,7% do volume nacional, o que equivale a cerca de 6.247.157 toneladas (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022).

Figura 1- Produção nacional e estadual de carvão vegetal de silvicultura



Os dados levantados sobre a produção de carvão de silvicultura por estado no Brasil revelam uma distribuição desigual. Alguns estados apresentam produção bastante significativa, enquanto outros não registraram produção durante o período analisado. Em 2022, o Estado do Pará teve produção de carvão vegetal a partir da silvicultura com cerca de 52.277 toneladas (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022). Em dados relacionados à silvicultura, é pouco produzido carvão vegetal no Estado do Pará em comparação aos outros estados brasileiros. O carvão é muito presente no estado de Minas Gerais, onde se concentra o maior consumo e produção no país (Indústria Brasileira de Árvores, 2021).

Na Tabela 1, pode ser observado o consumo de carvão vegetal de silvicultura pelas siderurgias no Brasil nos últimos 10 anos, no ano de 2022 foram consumidos 7.790.792 milhões toneladas de carvão vegetal. Na região Norte e Nordeste, existem atualmente quatro siderurgias em operação, as quais no ano de 2022 produziram 625.398 toneladas de ferro-gusa voltados para o mercado externo (Sindicado da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2023).

Tabela 1- Consumo em toneladas de coque e carvão vegetal pelas siderurgias

Ano	Siderurgia a Coque	Siderurgia a Carvão Vegetal			Total Geral
		Usinas Integradas	Usinas Independentes	Total a Carvão vegetal	
2013	23.916.956	2.283.244	5.352.074	7.635.318	31.552.274
2014	24.599.200	2.313.692	5.035.952	7.349.644	31.948.844
2015	25.592.840	2.210.560	4.306.998	6.517.558	32.110.398
2016	23.880.308	2.155.592	3.551.290	5.706.882	29.587.053
2017	25.891.186	2.440.214	3.819.653	6.259.867	32.151.053
2018	26.201.840	2.453.260	4.109.480	6.562.740	32.764.580
2019	23.948.080	2.332.220	4.621.210	6.953.430	30.901.510
2020	22.268.957	2.248.043	5.027.027	7.275.070	29.544.027
2021	26.141.388	2.388.412	5.247.820	7.636.232	33.777.620
2022	24.659.107	2.154.193	5.636.599	7.790.792	32.449.899

Fonte: IABr/SINDIFER (2023).

Para se obter 1 t de ferro-gusa, precisa-se em média, de 1,6 t de minério de ferro e 875kg de carvão vegetal, além de calcário (100 kg), manganês (40 kg) e quartzito (65 kg). Na produção do ferro-gusa pode ser usado tanto o carvão mineral quanto o vegetal, mas o vegetal se destaca pela reduzida quantidade de enxofre. Estão em funcionamento, no chamado Pólo Carajás, sete usinas (com 19 altos-fornos) no Maranhão e oito usinas (18 altos-fornos) no Pará, e todas obtêm ferro-gusa usando carvão vegetal (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2014).

5.2. Processo de carbonização

A pirólise lenta ou carbonização é o processo tradicional para a produção de carvão vegetal que consiste na decomposição térmica da madeira, resultando no produto carvão e gases condensáveis e não condensáveis nos subprodutos, além de fuligem, finos de carvão e cinzas. O processo de carbonização é influenciado por diversos fatores relacionados às características

físicas do forno, às variáveis do processo e às características da madeira, o que pode resultar em carvão com diferentes rendimentos e qualidade (Rodrigues et al., 2019).

Existem diferentes faixas de degradação o qual podem ser obtidas através do processo de carbonização, em temperatura de 200 a 280 °C, onde ocorre a degradação da hemicelulose e o CO₂ é emitido como produto da combustão, em temperaturas de 280 °C até o ponto máximo de aquecimento do forno (> 400 °C), ocorre a degradação da celulose e a lignina se decompõe, também ocorrem emissões de CO₂ e CH₄, e são produzidos materiais voláteis condensáveis e não condensáveis, enquanto a lenha é transformada em carvão vegetal, tendo assim, comportamentos térmicos de acordo com as diferentes temperaturas atingida (García-Quezada et al., 2023).

A carbonização é conhecida como a pirólise lenta envolve submeter materiais sólidos a altas temperaturas, como exemplo os resíduos florestais, tendo como objetivo concentrar o carbono e retirar o hidrogênio e oxigênio, onde o produto desta reação química é o carvão e seus subprodutos, que são compostos orgânicos condensáveis e gases não condensáveis, ou seja, a madeira que não sofreu reações químicas completamente. Durante esse processo são gerados três tipos de produtos, gases não condensáveis (CO₂, CO, CH₄, H₂, O₂, N), líquidos (alcatrões, ácido acético, álcool metílico e outros) e sólido (carvão vegetal), sendo estes potencialmente energéticos (Rousset et al., 2011).

Na madeira, os teores de carbono e oxigênio são, em média, respectivamente, de 49% e 44%, e depois da carbonização, esses teores passam, em média, no carvão vegetal para 82% e 13,7%, sendo assim, o carvão retém aproximadamente 57% do carbono da madeira, enquanto 89% do oxigênio são volatilizados (Santos, 2010). Entre os requisitos de qualidade do carvão vegetal para indústria, as normas indicam que o teor de carbono fixo deve estar entre 65 e 78%, material volátil < 25%, teor de cinzas < 10% e umidade < 10%, e exigem estritamente valores de 75%, 14%, 3% e 6%, respectivamente e baixos teores de umidade, material volátil e cinzas, e altos teores de carbono fixo e poder calorífico (García-Quezada et al., 2023).

5.3. Forno metálico de carbonização

O forno metálico oferece uma tecnologia mais avançada e duradoura em comparação a fornos de alvenaria do tipo "rabo-quente". Ele permite um melhor controle das variáveis do processo, como a temperatura e a queima de gases, resultando em uma distribuição de calor mais eficiente e rápida, com isso reduzindo o tempo do ciclo de carbonização. Essa tecnologia tem uma capacidade de carga bem superior aos fornos de alvenaria tipo rabo quente, além disso,

o uso de mecanização para o carregamento e descarregamento do forno, dessa forma aumentando a eficiência operacional e reduzindo às operações manuais (Figura 2).

Figura 2 – Protótipo de forno metálico



Fonte: Grupo KEILLA/CIKEL (2025).

Os fornos metálicos podem apresentar processo intermitente (batelada) e semi-batelada. Os principais fornos metálicos utilizados são: forno “Isomóvel”, forno Magnien, forno DPC e forno Bricarbras. As principais vantagens deste forno são: ciclo de carbonização acelerado, ciclo de resfriamento acelerado, não contaminação do carvão (pois sua base construtiva é feita de peças metálicas), facilidade de integração com o queimador e fácil monitoramento, carga e descarga (Rodrigues et al., 2019). Entre as desvantagens estão: a baixa consolidação tecnológica, poucas unidades de operação (ausência de um processo representativo em larga escala), concorrência com fornos retangulares e maior investimento que os de alvenaria (Barcellos, 2016).

No aspecto econômico, os fornos metálicos apresentam limitações por possuir altos investimentos. Além desse aspecto, a insegurança de produtores para investir em grandes quantidades, em sistemas ainda não consolidadas no mercado que possam garantir a eficiência e o retorno do investimento (Rodrigues, 2019).

Os fornos metálicos podem se apresentar de diferentes tamanhos e formas, sendo fixos ou móveis, neste último caso, podendo sempre ser instalados próximos às fontes de matéria-prima. Novas tecnologias para a região Amazônica, estão sendo idealizadas para substituir os métodos tradicionais de produção do carvão vegetal, em fornos de alvenaria. Os fornos metálicos estão sendo construídos com o objetivo de aperfeiçoar a produção de carvão vegetal,

reduzindo o tempo de carbonização, aumentando os rendimentos, aproveitando os subprodutos do processo e reduzindo os custos logísticos (Donato et al., 2017).

5.4. Resíduos de manejo florestal

Conforme normativa Ibama/MMA nº 5, de 6 de dezembro de 2011, são considerados resíduos da exploração florestal: galhos, sapopemas, restos de troncos de árvores provenientes das árvores exploradas (árvores derrubadas), que podem ser utilizados como produtos secundários do manejo florestal para a produção de madeira e energia. A utilização energética de biomassas residuais provenientes do manejo florestal, bem como sua forte utilização de energia renovável se adequa às demandas atuais de aproveitamento dos recursos com um mínimo de desperdício de recursos naturais.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (Brasil, 2018) a Região Amazônica apresenta grande potencial de utilização dos resíduos do manejo florestal sustentável. Estima-se que para cada tonelada de madeira extraída em planos de manejo certificados na Amazônia, são geradas 2,14 toneladas de resíduos, especialmente durante o manejo florestal (9-18%) e no processo de beneficiamento das toras (45-55%) (Numazawa et al., 2017). As indústrias madeireiras na Amazônia são os setores que mais geram resíduos florestais no país, como restos de tronco não aproveitados durante o traçamento e a galhada, folhas e outros (Rodrigues, 2018). Os resíduos de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), têm se mostrado uma alternativa viável para produção de carvão vegetal como termo redutor do ferro gusa (Lima, 2021).

Nesse contexto, o uso de resíduos de exploração florestal para a produção de carvão pode ser uma alternativa viável, reduzindo os danos ambientais de forma sustentável, com foco econômico e social, contribuindo para o aproveitamento dos resíduos e aumentando a produtividade florestal (Castro, 2014; Food And Agriculture Organization, 2017).

5.5. Propriedades físicas da madeira e do carvão vegetal

5.5.1. Umidade

A umidade pode ser definida como a massa de água contida na biomassa e que pode ser expressa tanto na base úmida (bu) quanto na base seca (bs), a qual pode ser avaliada pela diferença entre as massas de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem (Nogueira et al., 2007). Quando se utiliza a biomassa para a geração de energia o ideal é usar a umidade

na base úmida, pois ele expressa a quantidade de água no peso total da amostra que está sendo avaliada, na forma que será utilizada para a geração de energia (Brand, 2010). A umidade da madeira afeta muito o tempo de carbonização e o rendimento do carvão vegetal, além da sua friabilidade. O carvão é um produto higroscópico, ou seja, possui elevada capacidade de adsorver umidade, podendo em poucas horas absorver de 4 a 16% de sua massa em água em carvão recém-produzido (Silva et al., 2017). Dessa forma, quanto maior a umidade, maior será a perda de energia da biomassa (Foelkel et al., 2016).

A umidade de 15 a 20% (base úmida) é o mais adequado para a maioria dos fornos de carbonização, pois o processo de evaporação da umidade da biomassa requer energia (Antal e Gronli, 2003). Essa umidade reduz o poder de combustão da madeira (Assis et al., 2012). Caso a madeira não seja submetida a um aquecimento prévio para redução de umidade, a mesma deve ser empilhada ao ar livre num período entre 90 e 150 dias, para secagem e posterior carbonização (Ministério do Meio Ambiente, 2019).

No que refere a umidade do carvão, para uso siderúrgico, o limite máximo admissível deve ser <12% de umidade, pois acima o poder calórico na combustão reduz significativamente a temperatura na câmara de queima e na temperatura dos gases de escape (Nogueira; Lora, 2003).

5.5.2. Densidade básica e aparente

Dentre as diversas formas para expressar a densidade da madeira, a básica é a que fornece maior segurança na relação entre a massa seca absoluta e o volume verde ou totalmente saturado de água. A densidade é a massa presente por unidade de volume e pode ser expressa em gramas por centímetros cúbicos (g/cm^3) ou quilogramas por metros cúbicos (kg/m^3) (Morais et al., 2005; Penedo, 1980).

A densidade é uma importante propriedade da madeira e deve ser considerada no seu uso como combustível, pois se relaciona diretamente com a produção de energia, ou seja, quanto maior a densidade, maior a quantidade de energia estocada por unidade de volume (Protásio et al., 2014). É desejável madeira de elevada densidade básica, pois produz carvão mais denso para otimizar o processo de redução do minério de ferro nos altos fornos siderúrgicos, bem como reduzir custos com o transporte e o consumo específico do reator (Neves et al., 2011).

Com base na classificação de Watai (1991), as madeiras de densidade baixa apresentam valores de ($0,400 \leq a < 0,500 \text{ g.cm}^{-3}$), média densidade ($0,550 \leq a < 0,750 \text{ g.cm}^{-3}$) e alta densidade ($0,750 \leq a < 0,950 \text{ g.cm}^{-3}$).

A densidade aparente do carvão vegetal consiste na medição de volume e peso de várias peças de carvão, considerando os poros internos como ocupados pelo material carvão (Carneiro et al., 2011).

O carvão para uso siderúrgico deve apresentar densidade aparente superior de $0,35 \text{ g.cm}^{-3}$ (Silva et al., 2016). Sabe-se que quanto maior a densidade aparente do carvão, maior será a sua resistência mecânica, maiores serão os estoques energéticos e de carbono fixo (Protásio et al., 2013; Moutinho et al., 2017), interferindo, positivamente, no consumo específico do reator.

5.5.3. Densidade à granel do carvão

Existem vários fatores que podem influenciar a determinação dos valores da densidade a granel, entre eles, a granulometria, umidade e dimensões do recipiente utilizado na determinação do volume (Nogueira; Lora, 2003). De acordo com Raad (2017), o carvão vegetal direcionado para indústria siderúrgica deve apresentar valor de densidade a granel acima de 180 kg.m^3 , além de possuir alta resistência à compressão.

Essa densidade a granel pode ser determinada de acordo com a norma ABNT NBR 6922/1981. A verificação é realizada pela massa do carvão contido em uma caixa de 1 m^3 , a massa total subtraída do peso da caixa consiste na massa do carvão, por m^3 .

A densidade aumenta à medida que o tamanho da partícula diminui, devido ao fato de que os espaços vazios entre essas partículas são menores, desta forma quanto maior a densidade a granel, maior a massa que pode ser transportada ou armazenada num recipiente de volume fixo (Kumar et al., 2020).

5.6. Características químicas do carvão

5.6.1. Teor de materiais voláteis

Podem ser definidos como substâncias que são desprendidas da madeira como gases durante a carbonização ou na queima do carvão vegetal. Os materiais voláteis incluem os gases combustíveis e não combustíveis como: O_2 , N , CH_4 , CO e H_2 sendo que esses materiais

possuem a propriedade de rápida volatilização, o que contribui positivamente para as propriedades energéticas. Os voláteis no carvão vegetal para uso siderúrgico devem estar entre 25% e 35%, pois esta é uma variável inversamente proporcional ao teor de carbono fixo, comprometendo, dessa forma, a eficiência do redutor durante as operações (Picancio et al., 2018).

O ideal é que o carvão vegetal apresente menor percentual de voláteis, visto que correspondem aos resíduos volatilizados, e uma alta quantidade de carbono fixo o que irá desacelerar a combustão no forno e melhorar rendimento do material nos fornos (Lins et al., 2020). A degradação térmica para remover voláteis está associada a uma perda de massa que é inversamente proporcional ao rendimento gravimétrico. O teor de materiais voláteis foi definido como uma complexa mistura de gases e líquidos provenientes da decomposição térmica e que promovem uma fácil e rápida combustão da biomassa (Yang et al, 2007; Amutio et al., 2012). Porém, essas propriedades contribuem para determinar a estabilidade da chama e a velocidade de combustão, pois promove o aumento da permeabilidade da carga no alto-forno.

5.6.2. Teor de cinzas

Os resíduos resultantes da combustão de componentes orgânicos e da oxidação de componentes inorgânicos são caracterizados pelo teor de cinzas (Nogueira; Rendeiro., 2008). Portanto, as cinzas são resultado da queima de biomassa em altas temperaturas, sendo necessário entender o comportamento dessas cinzas para evitar o manuseio inadequado.

As cinzas, pode afetar negativamente as propriedades mecânicas do ferro gusa, contribui para a corrosão dos equipamentos de queima e reduz o poder calorífico e a resistência mecânica do combustível, por não participarem da combustão (Pereira et al., 2013; Protasio et al., 2014; Lima et al., 2020). Para ser utilizado na siderurgia, o carvão não deve conter valores acima de 1,5% desse material, pois podem afetar a queima e dificultar a gaseificação, em razão das interações entre a fração inorgânica e a matéria combustível (Rousset et al., 2011).

Na composição química das cinzas há elementos inorgânicos que podem servir como catalisadores, facilitando a ignição do carvão vegetal (Massuque et al., 2021). Além disso, os elevados percentuais de cinzas apresentam forte tendência a formar incrustações dentro dos equipamentos de queima, devido aos elevados teores de sílica e óxidos alcalinos, o qual reduz a eficiência energética e dificulta a troca de calor (Pelanda et al., 2015).

5.6.3. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo refere-se à porcentagem de biomassa após a remoção de umidade, cinzas e substâncias voláteis. Segundo Frederico (2009), 50% do carbono fixo presente no carvão vegetal é devido à degradação da lignina. Nesta fase ocorre a redução da vazão dos gases em função da redução dos compostos voláteis e fixação do carbono fixo no carvão vegetal. Deve-se mencionar que temperaturas finais de carbonização mais elevadas aumentam o carbono fixo no carvão vegetal com a diminuição do teor de materiais voláteis, porém causam redução no rendimento gravimétrico em carvão (Oliveira et al., 2010).

O rendimento de carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e massa específica da biomassa, e inversamente proporcional ao teor de holocelulose. O aumento do teor de carbono proporciona o aumento do Poder calorífico superior, ao mesmo tempo em que promove maior tempo de permanência em queimadores devido à queima mais lenta e uniforme (Teleken et al., 2015). A composição química do carvão está diretamente correlacionada à composição química da matéria prima que lhe deu origem, na qual maiores teores de carbono e menores teores de cinzas tendem a produzir maior poder calorífico (Pereira et al., 2013). Para operação de alto-forno, é preferível teor de carbono fixo superior a 75% (Bruzual, 2015).

5.6.4. Poder calorífico

O poder calorífico do carvão está diretamente relacionado ao seu teor de carbono fixo e inversamente correlacionado aos teores de materiais voláteis e de cinzas (Du et al., 2014). Por contribuir positivamente para a geração de energia e devido aos seus maiores valores percentuais no carvão, o carbono é o elemento que apresenta maior contribuição para o poder calorífico. O poder calorífico representa a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do combustível (Pinto et al., 2021).

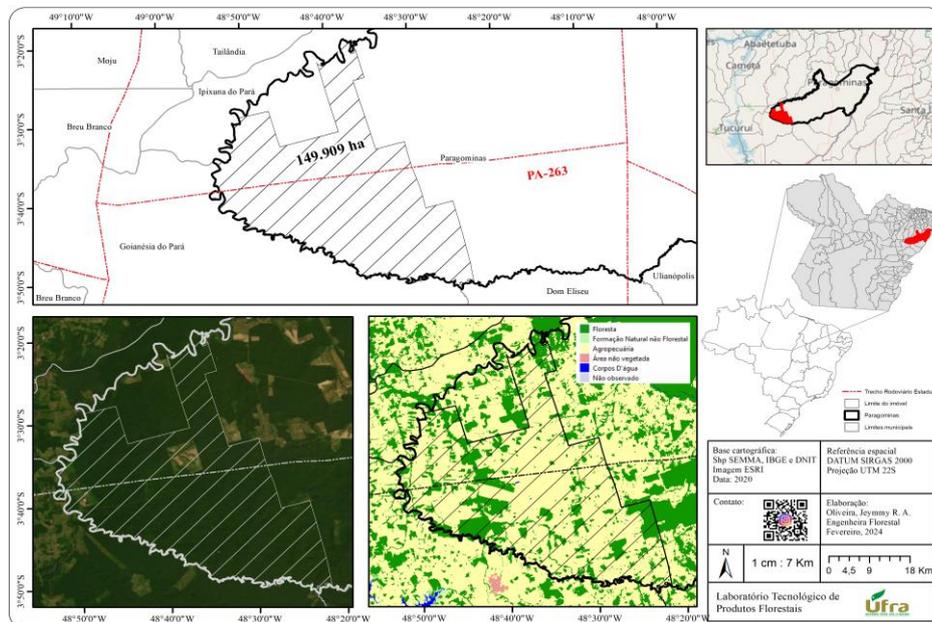
O Poder Calorífico é dividido em superior e inferior: Poder Calorífico Superior (PCS) é onde a combustão ocorre a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (Briane; Doat., 1985). Já o poder calorífico inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas da água evaporada, ou ainda, o valor obtido levando-se em consideração a água no estado de vapor ao final da combustão (Quirino et al., 2004).

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1. Local de estudo

O presente trabalho foi realizado na Fazenda Rio Capim, pertencente ao Grupo KEILLA, no Município de Paragominas – PA (Figura 3), localizada na região leste do Estado do Pará, a uma altitude de 84 metros, a $3^{\circ}33'56.8''S$ de latitude e $48^{\circ}38'36.6''W$ de longitude. A rodovia BR-010 é a principal via de acesso. Segundo a classificação de Koppen, o clima é classificado como Aw. A temperatura média anual varia entre $23,3^{\circ}C$ a $27,3^{\circ}C$ e a umidade relativa do ar apresenta média anual de 81% com a precipitação média de 1743 mm.

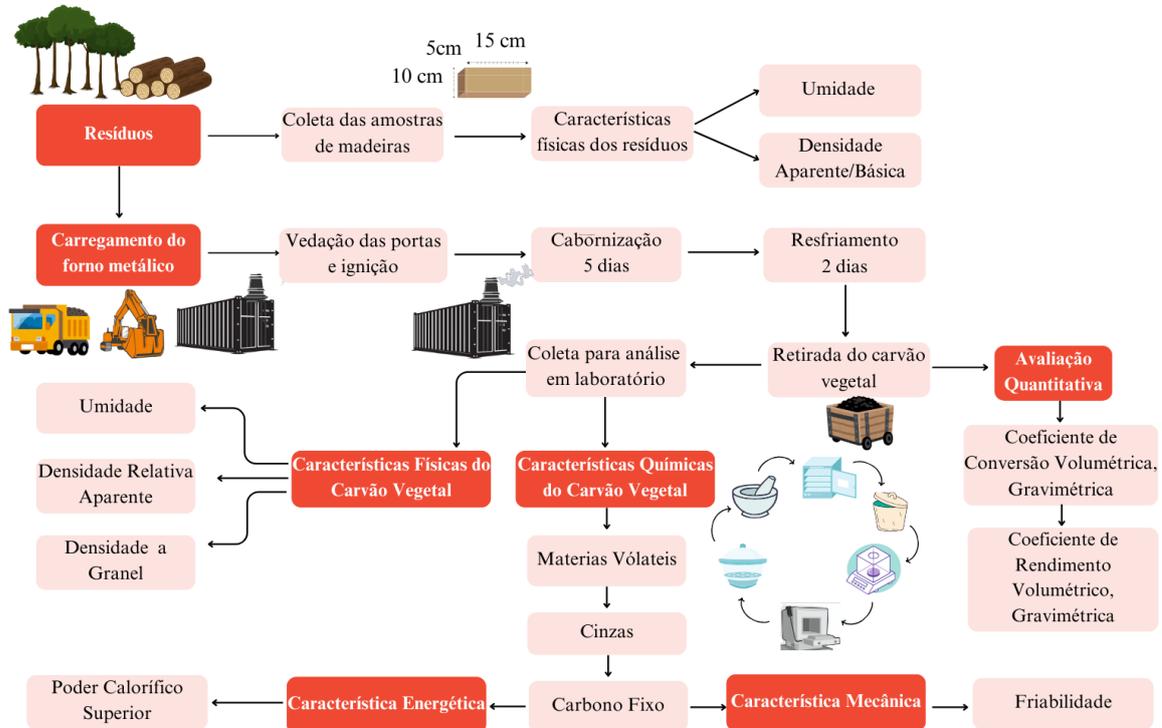
Figura 3 - Localização da Fazenda Rio Capim no município de Paragominas/PA



Fonte: Autor (2025).

Os procedimentos realizados neste trabalho estão descritos nas subseções a seguir. O fluxograma de seleção e caracterização dos resíduos florestais, processo de carbonização em forno metálico e caracterização do carvão pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma do processo de produção de carvão vegetal



Fonte: Autor (2025).

6.2. Seleção e caracterização dos resíduos florestais para carbonização

No momento de carregamento dos resíduos no forno, de forma prática (experiência do operário), os resíduos foram separados e cortados (Figura 5) e os corpos de prova foram classificados de forma empírica: Madeira pesada – Madeira média – Madeira leve. Foram retirados 10 corpos de prova de cada uma dessas classes com dimensões de 15 cm de comprimento, 5cm de altura e 10 cm de largura, obtendo-se 30 corpos de prova por fornada. Nesta pesquisa, foram realizadas cinco carbonizações, totalizando 150 corpos de prova que foram usados para determinar as propriedades físicas da madeira: densidade aparente, densidade básica e umidade.

Figura 5 – Procedimentos de classificação dos resíduos florestais por densidade. (a) seleção dos Resíduos; (b) corte de discos; (c) amostras de diferente densidade; (d) corte das amostras na serraria para produção de corpos de prova; (e) corpos de prova; e (f) pesagem dos corpos de prova (f)



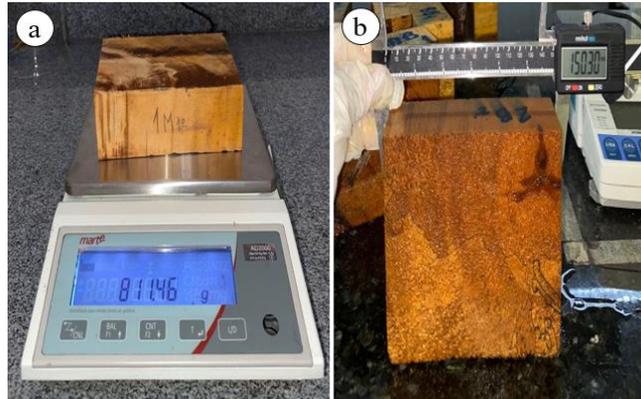
Fonte: Autor (2025).

6.3. Características físicas dos resíduos

6.3.1. Densidade aparente

A densidade aparente foi determinada no local, obtendo-se o peso da massa do corpo de prova úmido ($P_{(u)}$) em uma balança digital e o volume do corpo de prova úmido ($V_{(u)}$) que correspondeu ao produto das arestas 10 x 5 x 15 (Largura x Altura x Comprimento) medidas com paquímetro digital (Figura 6: a e b). A densidade aparente foi determinada pela equação 1, e a densidade básica pela equação 2, seguindo-se as recomendações da norma MB 1269/79 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

Figura 6 – Determinação da densidade aparente. (a) Pesagem da amostra; (b) determinação do volume



Fonte: Autor (2025).

$$DAp = \frac{P_{(u)}}{V_{(u)}} \quad (1)$$

DAp – densidade aparente a um teor de umidade, g/cm³;

P(u) – peso do corpo de prova úmido, g;

V(u) – volume do corpo de prova úmido, cm³.

$$DBás = \frac{P_{(0)}}{V_{(sat)}} \quad (2)$$

Considerando que,

DBás – densidade básica, g/cm³;

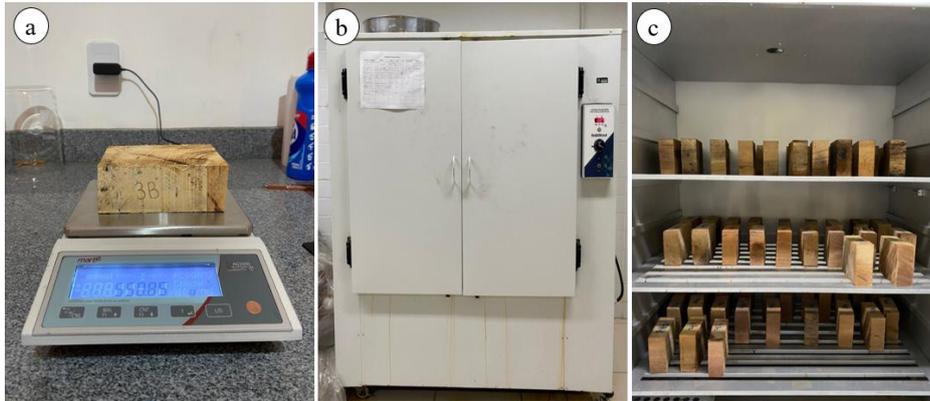
P(0) – peso da massa seca, g;

V_(sat) – volume do corpo de prova saturado, cm³.

6.3.2 Teor de Umidade

Os corpos de prova utilizados para determinação das densidades aparente e básica serviram também para se determinar a umidade de resíduos, com os dados de peso dos corpos de prova úmido (Pu) e peso seco (Po) obtido após secagem em estufa (Figura 7). A umidade foi determinada para cada classe especificada no item – 7.3, sendo calculado pela equação 3.

Figura 7 – Determinação da umidade. (a) Pesagem da amostra úmida; (b) secagem na estufa; (c) amostra seca



Fonte: Autor (2025).

$$TU = \frac{P_{(u)} - P_{(o)}}{P_{(o)}} \times 100 \quad (3)$$

TU – teor de umidade da amostra (base seca) %;

P(u) – peso da amostra úmida, g;

P(o) – peso da amostra seca, g.

6.4. Carbonização em forno metálico com injeção de gases quentes

As carbonizações foram realizadas com resíduos procedentes de Plano de Manejo Florestal da empresa.

O forno metálico com injeção de gases quentes, possuindo dutos de ar no interior do forno para melhor circulação dos gases, além disso, é construído de metal fundido de parede dupla preenchida de material refratário e dimensionado com capacidade volumétrica em torno de 35,2 m³, com 2,30 m de largura 2,30 m de altura e 6,65 m de comprimento para carbonização de resíduos de madeira (industriais e florestais), podendo ser fixo ou móvel. O ciclo de conversão pirolítica é constituído de carregamento, carbonização, esfriamento e descarregamento do forno.

A avaliação e o ajuste do forno objetivam determinar a eficiência do processo, levando-se em consideração, a tecnologia e as condições da matéria prima a ser utilizada no estudo, visando a substituição do forno rabo-quente. O ciclo da carbonização foi de 7 (sete) dias, sendo 5 (cinco) dias correspondendo a carregamento, ignição e carbonização e 2 (dois) dias para resfriamento.

O carregamento do forno foi realizado mecanicamente, utilizando-se uma carregadeira, onde os resíduos de várias densidades foram introduzidos pela parte superior do forno e depois fechado, iniciando-se a ignição do forno (Figura 8).

Figura 8 – Etapas da carbonização em forno metálico. (a) Pesagem do resíduo; (b) forno metálico vazio; (c) descarregamento do resíduo; (d) ignição; (e) carbonização; (f) carvão vegetal



Fonte: Autor (2025).

6.5. Avaliação quantitativa do processo de carbonização

Essa etapa correspondeu em duas formas de avaliação:

(1) Determinação dos coeficientes de rendimento volumétrico (CRV) e gravimétrico (CRG), através das equações 4 e 5:

$$CRV = \frac{VC_{(m^3)}}{VRes_{(m^3)}} \times 100 \quad (4)$$

Considerando que,

CRV – coeficiente de rendimento volumétrico, %;

$VC_{(m^3)}$ – volume de carvão, m^3 ;

$VRes_{(m^3)}$ – volume de resíduos enforados (m^3).

$$CRG = \frac{PC_{(t)}}{PR_{(t)}} \times 100 \quad (5)$$

Considerando que,

CRG – coeficiente de rendimento gravimétrico, %;

$PC_{(t)}$ – peso de carvão, t;

$PR_{(t)}$ – peso de resíduos enforados (t).

O volume geométrico de carvão produzido foi determinado com a mesma metodologia de volume geométrico de resíduos conforme mostrado na Equação 6:

$$VC_{(m^3)} = \frac{PC_{(kg)}}{DAPC_{\left(\frac{kg}{m^3}\right)}} \quad (6)$$

Considerando que,

$VR_{(m^3)}$ – volume de carvão produzido, m³;

$PR_{(kg)}$ – peso dos resíduos introduzidos no forno, kg;

$DAPC_{(kg/m^3)}$ – densidade aparente do carvão (kg/m³).

(2) Determinação dos coeficientes de conversão volumétrica (CCV) e gravimétrica (CCG) da madeira em carvão, calculados através das equações 7 e 8.

$$CCV = \frac{VC_{(mdc)}}{VR_{(m^3)}} \quad (7)$$

Considerando que,

CCV – coeficiente de conversão volumétrica, mdc/m³;

$VC_{(mdc)}$ – volume de carvão, mdc;

$VR_{(m^3)}$ – volume de madeira (m³).

$$CCG = \frac{PC_{(t)}}{VR_{(m^3)}} \quad (8)$$

Considerando que,

CCG – coeficiente de conversão gravimétrica, t/m³;

$PC_{(t)}$ – peso de carvão, t;

$VR_{(t)}$ – volume de madeira (m³).

O volume geométrico dos resíduos foi determinado com base na Equação 9 de densidade aparente de resíduos:

$$VR_{(m^3)} = \frac{PR_{(kg)}}{DApR_{\left(\frac{kg}{m^3}\right)}} \quad (9)$$

Considerando que,

$VR_{(m^3)}$ – volume de resíduos introduzido no forno, m³;

$PR_{(kg)}$ – peso de resíduos introduzidos no forno, kg;

$DApR_{(kg/m^3)}$ – densidade aparente de madeira (kg/m³).

6.6. Avaliação qualitativa do carvão vegetal

O carvão de resíduos produzido com o forno protótipo foi caracterizado sob os aspectos físico, químico, energético e mecânico, a segregação de densidade do carvão foi feita de forma manual.

6.6.1. Características físicas do carvão

O teor de umidade foi determinado com base na relação entre o peso seco e o peso do carvão úmido, conforme NBR 14929 (ABNT, 2003), sendo calculado através das equações 10.

(10)

Considerando que,
$$TU = \frac{PC_{(u)} - PC_{(o)}}{PC_{(u)}} \times 100$$

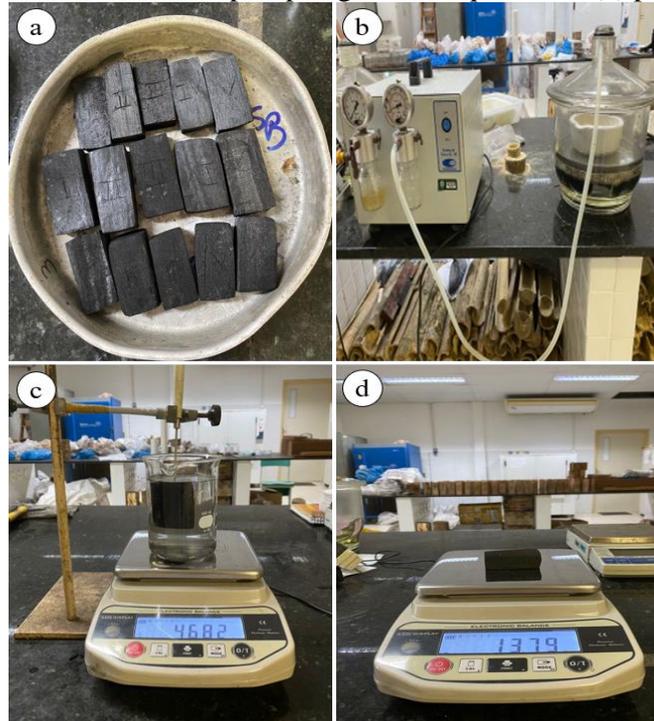
TU – teor de umidade do carvão, (%);

$P_{(u)}$ – peso do carvão úmido, kg;

$P_{(o)}$ – peso do carvão seco, kg.

A densidade relativa aparente do carvão foi preparada 15 corpos de prova para cada carbonização, conforme os preceitos da norma densidade básica, descritos na NBR 11491 (ABNT, 2003). A saturação dos corpos de prova foi realizada por imersão do material em água, utilizando-se bomba à vácuo ($VC_{(sat)}$), em seguida, foi determinado o volume e colocados para secagem em estufa à 105 °C até atingir o peso constante, obtendo-se a massa seca ($PC_{(o)}$) (Figura 9), e a densidade relativa aparente básica calculada através da equação 11.

Figura 9 – Determinação da densidade relativa aparente básica. (a) Corpo de prova; (b) saturação da amostra; (c) volume da amostra saturada pela pesagem de Arquimedes; (d) pesagem da amostra seca



Fonte: Autor (2025).

$$D_{(Ap)} = \frac{PC_{(0)}}{VC_{(sat)}} \quad (11)$$

Considerando que,

$D_{(Ap)}$ – densidade relativa aparente do carvão, (g/cm^3);

$PC_{(0)}$ – peso do carvão seco, g;

$VC_{(sat)}$ – volume do carvão saturado, g.

A densidade a granel expressa relação entre o peso dos pedaços de carvão contidos em um recipiente de volume conhecido, calculada através da equação 12. A densidade a granel foi determinada com base na norma NBR 6922 (ABNT,1981).

$$DC_{(granel)} = \frac{PC_{(granel)}}{V_{(recipiente)}} \quad (12)$$

Considerando que,

$DC_{(granel)}$ - densidade do carvão a granel (kg/mdc^1);

$PC_{(granel)}$ - peso do carvão a granel (kg);

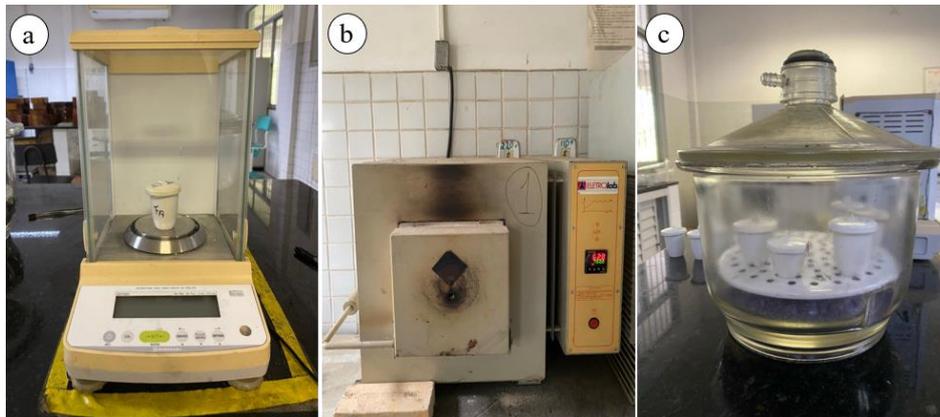
$VC_{(recipiente)}$ - volume de carvão contido no recipiente (mdc).

6.6.2. Características química do carvão

As análises químicas do carvão vegetal se referem à determinação da porcentagem dos teores de materiais voláteis (TMV), de cinzas (TCi) e de carbono fixo (TCF) contidos no carvão, com base na Norma da ASTM D5865 (ASTM, 2013).

Corresponde a relação entre o peso de voláteis contidos na matriz sólida e o peso do carvão. O procedimento foi realizado com 5 (cinco) amostras de carvão moído para cada classificação de classe de carvão em densidade baixa, média e alta para cada carbonização, totalizando 15 repetições por carbonização para todas as análises químicas. Foram utilizados 15 (quinze) cadinhos com tampa, 5 (cinco) cadinhos para cada densidade contendo cerca de 3 g de carvão absolutamente seco, que serão submetidos à calcinação sob temperatura de 950 °C durante 6 minutos (Figura 10). Finalizado o tempo de calcinação, os cadinhos foram retirados da mufla e colocados em dessecador para esfriamento e, finalmente, realizada a pesagem para obtenção de peso do carvão calcinado e o teor de materiais voláteis calculado através da equação 13.

Figura 10 – Determinação de Teor de Materiais Voláteis: Balança analítica (a), Mufla (b), Dessecador (c)



Fonte: Autor (2025).

$$TMV = \frac{PC_{(0)} - PC_{(calc)}}{PC_{(0)}} \times 100 \quad (13)$$

Considerando que,

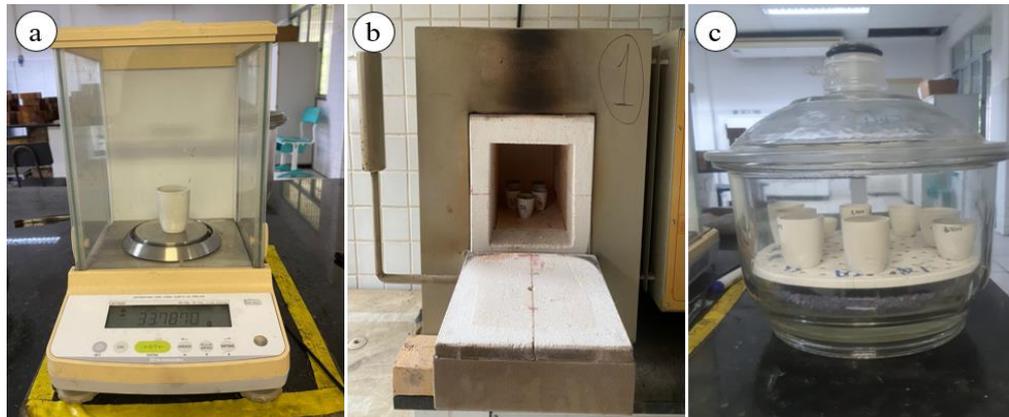
TMV - teor de materiais voláteis contidos no carvão (%);

PC₍₀₎ - peso do carvão seco (g);

$PC_{(calc.)}$ - peso do carvão calcinado à 950 °C (g).

O teor de cinzas corresponde a relação entre o peso de cinzas contidas na matriz sólida e o peso do carvão absolutamente seco. Para determinação do teor de cinzas, utilizou-se também 5 (cinco) cadinhos de porcelana sem tampa para cada densidade, o qual foi submetido à combustão completa sob temperatura de 750 °C durante 6 (seis) horas (Figura 14). Finalizado essa etapa, o teor de cinzas calculado através da equação 12.

Figura 11 – Determinação de teor de cinzas: Balança analítica (a), mufla (b) e dessecador (c)



Fonte: Autor (2025).

$$TCi = \frac{P_{(Ci)}}{PC_{(0)}} \times 100 \quad (14)$$

Considerando que,

TCi - teor de cinzas contidas no carvão (%);

$P_{(Ci)}$ - peso de cinzas (750 °C) (g);

$PC_{(0)}$ - peso do carvão seco (g).

O teor de carbono fixo corresponde ao material sólido do carvão, calculado pelas equações 15 e 16.

$$TCF_{(bu)} = 100 - (TU + TMV + TCi) \quad \text{Base úmida} \quad (15)$$

$$TCF_{(bs)} = 100 - (TMV + TCi) \quad \text{Base seca} \quad (16)$$

Considerando que,

$TCF_{(u)}$ – teor de carbono fixo do carvão, base úmida (%);

$TCF_{(s)}$ – teor de carbono fixo do carvão, base seca (%);

TU – teor de umidade do carvão (%);

TMV – teor de materiais voláteis contidos no carvão (%);

TCi – teor de cinzas contidas no carvão (%).

6.6.3. Característica energética do carvão

As características energéticas do carvão se referem a determinação de poder calorífico superior, foi feita uma estimativa com base na metodologia de Parikh et al. (2005), através das equações 17.

$$PCS = 84,51 \times TCF + 37,2601 \times TMV - 1,8642 \times TCz \quad (17)$$

Considerando que,

PCS – poder calorífico superior do carvão (kcal/kg);

TCF – teor de carbono fixo contido no carvão (%);

TMV – teor de materiais voláteis contidos no carvão (%);

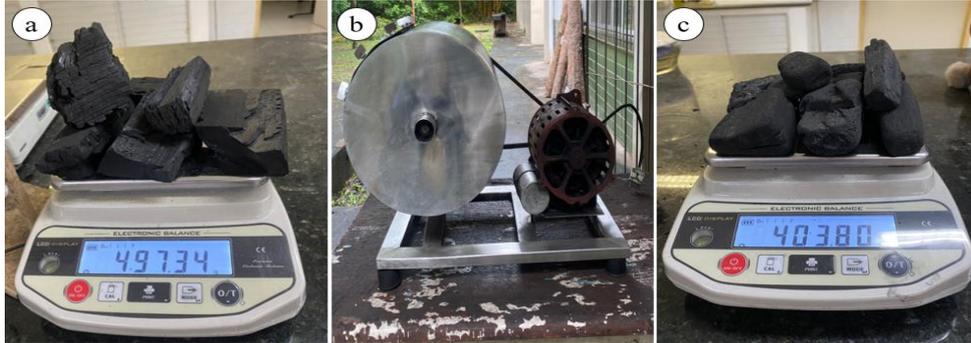
TCi – teor de cinzas contidas no carvão (%).

6.6.4. Característica mecânica do carvão

A propriedade mecânica (friabilidade) consiste na resistência mecânica do carvão a esforços de atrito e choque na formação de partículas, devido ao seu manuseio (descarregamento, embalagem e transporte).

Utilizam-se amostras aleatórias de carvão sem segregação de densidades, passadas em uma peneira com malha de 5 x 5 cm de seção transversal e retidas em outra com malha de 2 x 2 cm. O comprimento do carvão variou de 5 a 10 cm. Para o teste de friabilidade, utilizou-se cerca de 500 gramas de carvão, correspondendo ao peso inicial do carvão (P_i). Posteriormente, as amostras foram submetidas a 30 rpm, em um tambor, por 10 minutos. Após o tamboramento, todo o carvão retido na peneira com malha de 2 x 2 cm, é pesado, correspondendo ao peso do carvão remanescente (P_r), como base a NBR 8740 (ABNT, 1985) e a friabilidade é calculada através da equação 18.

Figura 12 – Determinação de friabilidade. Peso da amostra antes do tamboramento (a), Tambor automático (b), Pesagem da amostra após o tamboramento (c)



Fonte: Autor (2025).

$$F = \frac{PC(i) - PC(r)}{PC(i)} \times 100 \quad (18)$$

Considerando que,

F - friabilidade do carvão (%);

$P_{(i)}$ - peso inicial do carvão (g);

$P_{(r)}$ - peso do carvão remanescente após o tamboramento (g).

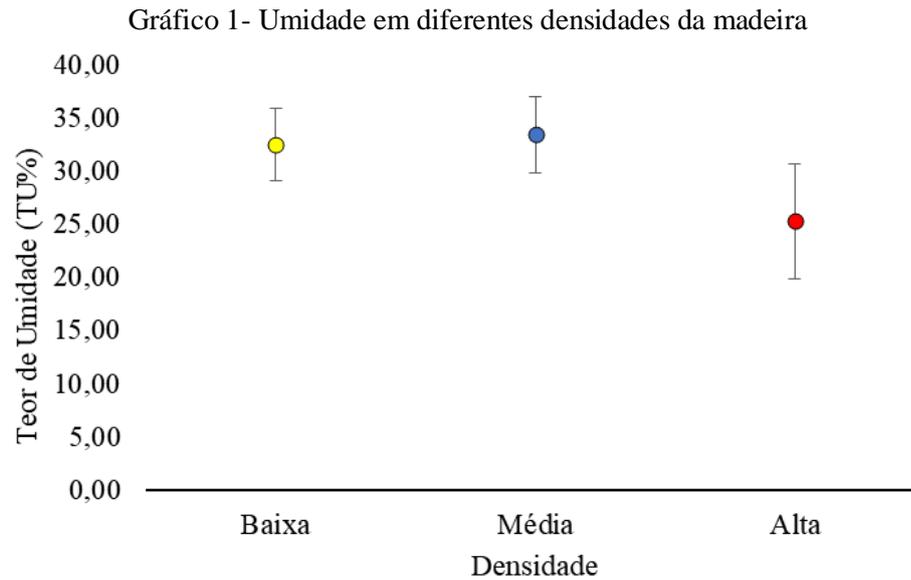
6.7. Análises estatísticas

A análise estatística das variáveis e geração dos gráficos foram realizadas através do software R-Studio, versão 1.4.1717 (R Project for Statistical Computing, RRID:SCR_001905) (RStudio, 2021). Para identificar diferenças estatísticas, utilizara-se a package ExpDes.pt e a função “dic”, esta biblioteca realiza análise de normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e igualdade das variâncias pelo teste Bartlett, igualmente fazendo a ANOVA. Posteriormente os dados foram submetidos ao teste Post-Hoc de Tukey, para todas as análises será considerado o nível de significância de 5%.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1 Teor de umidade da madeira

Os resíduos da exploração madeireira foram agrupados por teor de umidade, associando-se com as densidades da madeira para verificar o efeito dessas variáveis sobre as propriedades. Dessa forma, os testes estatísticos realizados indicaram que não houve diferença significativa nos teores de umidade da madeira entre os grupos de baixa densidade ($33,43\% \pm 3,59$), densidade média ($32,48\% \pm 3,42$) e densidade alta ($25,32\% \pm 6,56$), conforme mostrados no Gráfico 1.



Fonte: Autor (2025).

Lima et al. (2022), avaliaram resíduos de exploração madeireira de doze espécies amazônicas e relataram que a umidade variou em espécies com densidade muito baixa (*S. guianensis* e *T. guianensis* – 32,7%); baixa densidade (*Parkia* sp. – 45,4%); média densidade (*Caryocar* sp. 2 e *B. gaudichaudii* – 34,6% e 32,1%) e alta densidade (*D. excelsa* – 22,8%), (*Licania* sp. – 23,5%), (*Manilkara* sp. – 25,7%), (*Caryocar* sp.1 – 31,5%), (*Eschweilera* sp. 30%) e (*P. suaveolens* e *Pouteria* sp. – 21,5% e 27%) de umidade, valores próximos aos que foram encontrados neste trabalho com resíduos de manejo florestal de diferentes densidades. Isto demonstra que o teor de umidade depende de outros fatores e não somente da densidade da madeira.

Com base no Gráfico 1, as madeiras com menores densidades tenderam a ter maior umidade, provavelmente devido ao maior volume de espaços vazios (lúmen celular, poros e espaços intercelulares). Segundo Oliveira et al. (2005), madeiras de menor densidade apresentam maior porosidade, o que pode ser preenchida com água livre. A umidade da madeira é uma variável que influencia em alguns aspectos técnicos, em especial, quando se trata de produção de carvão. O teor de umidade da madeira mais adequado para a carbonização deve ser próximo a 25% na (base úmida) e entre 20 e 30% (base seca) (Brand, 2010). Segundo Lima et al. (2020), a madeira com umidade abaixo de 30% é desejável para produção de carvão vegetal.

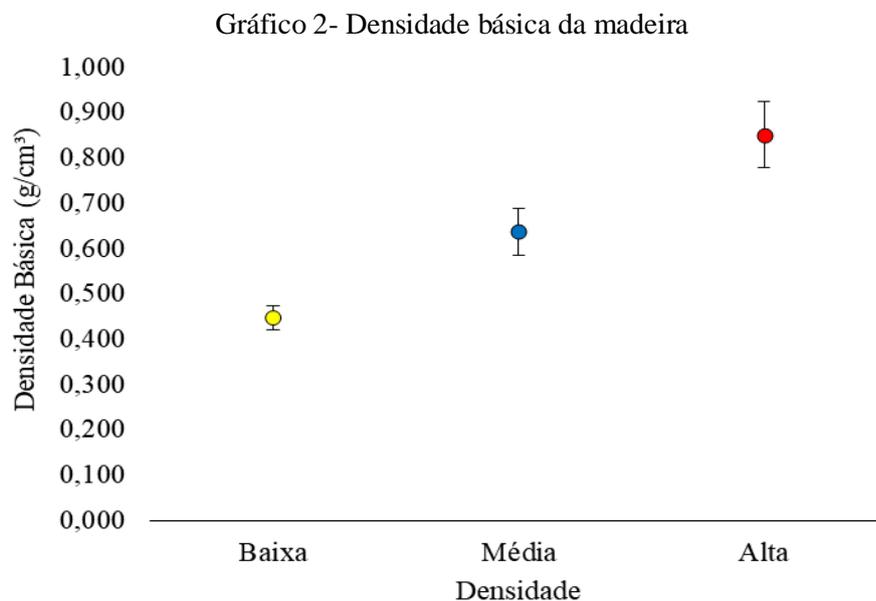
Valores mais elevados dificultam o processo de carbonização porque aumentam o consumo específico de energia, ocasionando uma redução no rendimento de carvão vegetal (Fortaleza et al., 2019; Lima et al., 2020). Os resíduos de alta densidade apresentaram umidade

mais apropriada para esta finalidade. Com relação às outras densidades, estas necessitam primeiramente ser expostas ao ar livre para secagem por mais longo tempo para redução da umidade.

Considerando que a umidade da madeira é uma variável que influencia negativamente na geração de energia, deve, portanto, ser controlada. Quanto maior o teor de umidade, menor será a produção de calor por unidade de massa, pois parte da energia liberada na combustão é gasta na vaporização da água, conseqüentemente, podendo afetar o rendimento no processo de carbonização (Brand, 2010). Além disso, promove uma taxa de aquecimento do forno mais lenta, liberação excessiva de vapor de água, resultando em uma temperatura mais baixa de carbonização, tempo de ignição e carbonização mais longa (Arruda et al., 2011).

7.2 Densidade básica da madeira (Db)

As amostras de madeira foram classificadas como de baixa densidade ($0,447 \pm 0,097$ g/cm³), média densidade ($0,638 \pm 0,052$ g/cm³) e alta densidade ($0,851 \pm 0,073$ g/cm³), conforme mostradas no Gráfico 2. As madeiras de baixa e média densidade, apresentaram ser mais consistentes em seus valores, enquanto a de alta densidade mostrou maior dispersão. Essa variação nos valores de densidade pode ser explicada pela diversidade de espécies tropicais.



Fonte: Autor (2025).

Com base na classificação de Watai (1991), as madeiras de densidade baixa apresentam valores de ($0,400 \leq a < 0,500$ g.cm⁻³), média densidade ($0,550 \leq a < 0,750$ g.cm⁻³) e alta

densidade ($0,750 \leq a < 0,950 \text{ g.cm}^{-3}$). Os três grupos de madeira estudada se encontram dentro das faixas de densidade determinadas por Watai (1991).

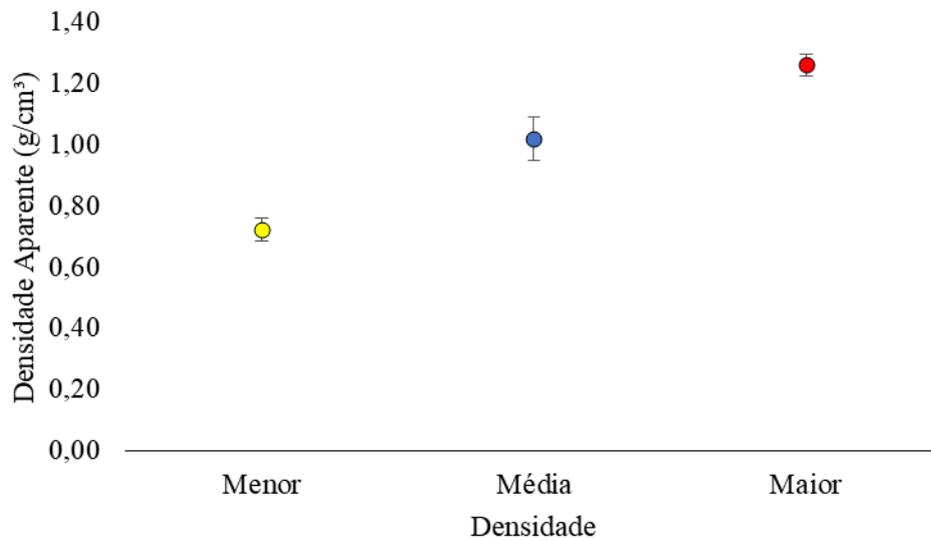
Fortaleza et al. (2019), ao estudarem as madeiras de *Ceiba pentandra* (Sumaúma), *Guatteria* sp. (Envirão) e *Brosimum* sp. (Mururé), esta última espécie foi classificada como madeira de média a moderada densidade e as demais espécies, consideradas de baixa densidade com valores médios de $0,430 \text{ g/cm}^3$, $0,463 \text{ g/cm}^3$ e $0,527 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Lima et al. (2022) para classificação de resíduos heterogêneos de exploração madeireira no manejo florestal na Amazônia, visando o aumento da produção e melhorar a qualidade do carvão vegetal, fizeram a segregação dos resíduos por classes de densidade. A classificação foi baseada na densidade básica, em cinco categorias (muito baixa, baixa, média, alto a muito alta). Foram encontradas grande variações de densidade básica como verificadas com *Parkia* sp (Fava-branca) $0,397 \text{ g/cm}^3$; *Caryocar* sp (Piquiá) $0,701 \text{ g/cm}^3$ e *Manilkara* sp (Maçaranduba) $0,872 \text{ g/cm}^3$, todos com resíduos do mesmo local deste estudo. Ribeiro et al. (2019) ao estudarem outras espécies amazônicas, igualmente, encontraram variações de densidades básicas como *Vochysia máxima* (guaruba) $0,54 \text{ g.cm}^{-3}$ e *Dinizia excelsa* (angelim-vermelho) e $0,92 \text{ g.cm}^{-3}$. Esses resultados dos autores citados, confirmam que as espécies amazônicas apresentam uma ampla gama de variação de densidades da madeira.

As espécies estudadas pelos autores mencionados são comumente encontradas nas listas de espécies exploradas em planos de manejo florestal. Portanto, as variações de densidade da madeira de resíduos florestais avaliados neste estudo, indicam compatibilidade às classes de densidade baixa, média e alta, definidas pelos autores citados.

7.3 Densidade aparente da madeira (Dap)

No Gráfico 3, está mostrada a variação significativa de densidade aparente da madeira (Dap) entre as diferentes categorias: $0,723 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ para a madeira de menor (ou leve) densidade, $1,021 \pm 0,07 \text{ g/cm}^3$ para média densidade, e $1,260 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ para a alta densidade. A densidade aparente média apresentou maior variabilidade em seus valores, o que pode ser explicado por fatores como a idade da árvore, a espécie, a localização geográfica e a posição da amostra dentro do tronco. Segundo Couto et al. (2022), madeiras com menores diâmetros de lúmen, maior espessura da parede e maior fração de fibras no tecido lenhoso tendem a apresentar maior densidade básica e maior densidade aparente. Esses fatores ajudam a explicar a variação observada nos resultados, mostrando que a Dap está ligada às características anatômicas da madeira atribuídas às diferenças estruturais entre as espécies.

Gráfico 3 – Densidade aparente de diferentes densidades por carbonização



Fonte: Autor (2025).

Ressalta-se que nessa questão de densidade aparente, a identificação de menor, média e maior, não corresponde exatamente às classes citadas em literaturas que tratam sobre densidade básica da madeira. Neste caso, a separação foi feita de forma empírica, apenas com base na experiência do operador de carbonização, separando-se as madeiras de menor densidade (considerada leve), média densidade (considerada intermediária) e maior densidade (considerada pesada).

Medeiros et al. (2021) analisaram propriedades da madeira de quatro espécies amazônicas: *Piptadenia suaveolens* (Timborana), *Caryocar villosum* (Pequiá), *Bowdichia nitida* (Sucupira amarela) e *Manilkara huberi* (Maçaranduba), todas obtidas do plano de manejo florestal. Foi determinada a densidade aparente, encontrando-se médias que variaram entre 0,86 g/cm³ e 0,98 g/cm³, com umidade variando de 28,48% a 35,99%. No conceito de classes anteriormente citadas, essas espécies se apresentaram como madeira pesada.

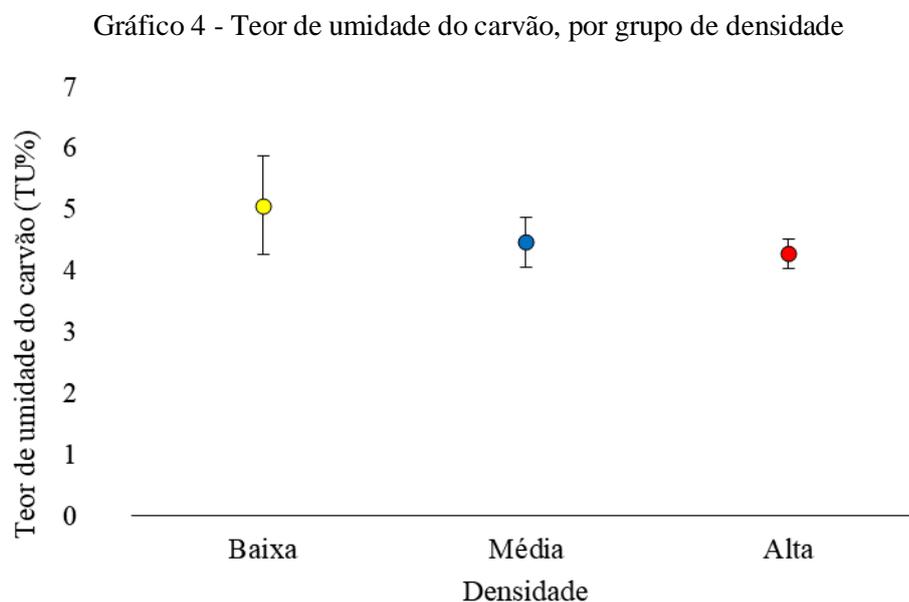
Lima et al. (2023) realizaram a segregação de resíduos da exploração madeireira na Amazônia, provenientes do manejo florestal para otimizar a carbonização em fornos de tijolos, utilizando 23 espécies. As densidades aparentes da madeira variaram de 0,466 g/cm³ em espécies de baixa densidade como *Simarouba amara* (AUBL) até 1,194 g/cm³ em espécies de alta densidade como *Dinizia excelsa*, Ducke, com umidade de 67,1% e 23,1%, respectivamente. Foi observado pelos autores que as madeiras recém-colhidas com alta DAp, como *D. excelsa*, *L. pisonis*, *M. elata* e *L. lurida*, apresentaram menor teor de umidade.

8. Características físicas do carvão

8.1 Teor de Umidade

No gráfico 4, encontram-se os resultados estatísticos de teor de umidade do carvão de resíduos de exploração florestal. Verificou-se que os teores médios variaram de $4,29\% \pm 0,24$ a $5,07\% \pm 0,65$, tendo-se registrado o maior valor médio para carvão produzido com madeiras de baixa densidade, seguido de $4,47\% \pm 0,46$ e $4,29\% \pm 0,24$, correspondentes a carvões de madeiras com média e alta densidade, respectivamente. A maior dispersão dos dados foi verificada com carvão obtido com madeiras menos densas, indicando o coeficiente de variação 19,1%, seguido de 10,33% e 5,68% para carvões de média e alta densidade.

Esse resultado sugere que madeiras menos densas por apresentar maior porosidade, resultando na formação de carvão mais poroso e, conseqüentemente, com maior possibilidade de absorver umidade do meio ambiente. O menor teor de umidade observado no carvão de alta densidade era esperado, tendo em vista a menor quantidade de espaços vazios, portanto, menor acessibilidade de entrada de água.



Fonte: Autor (2025).

Esse argumento corrobora a afirmação de Oliveira et al. (2005) de que os espaços vazios encontrados no carvão são deixados pela porosidade da madeira, os quais podem absorver água. Teleken et al. (2022) também encontraram umidade do carvão vegetal de alta densidade de 7,08% e de baixa densidade 8,47%, proveniente de resíduos de plano de manejo florestal,

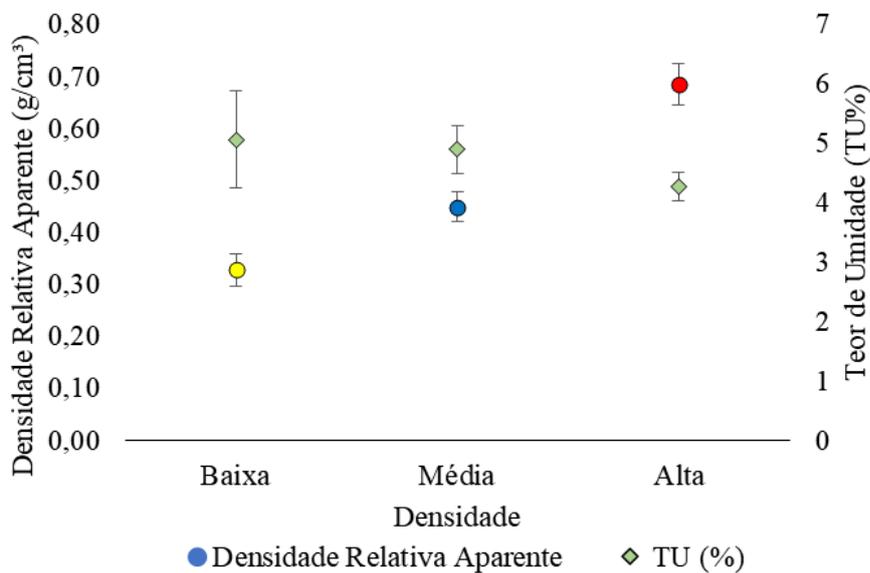
confirmando que carvão mais denso tende a absorver menor quantidade de umidade. Fortaleza (2019), ao avaliar as propriedades do carvão vegetal de resíduos florestais das espécies *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (Envirão), *Guatteria* sp. (Samaúma), *Brosimum* sp. (Mumuré) com densidade aparente variando de 0,2628 a 0,3173 g/cm³, obtiveram valores de umidade (6,91 %, 6,87 %, 7,40 %), valores superiores aos observados nesse estudo.

Destarte, pode-se sugerir que as varrições de teor de umidade têm relação com a porosidade e estão condicionadas à exposição do carvão ao meio ambiente.

8.2. Densidade relativa aparente do carvão vegetal (DRAp)

No Gráfico 5, encontram-se os resultados estatísticos de densidade aparente (DRAp) do carvão, tendo-se registrado médias 0,330 g/cm³; 0,507 g/cm³ e 0,686 g/cm³ para carvões produzidos com madeiras de densidade baixa, média e alta, respectivamente. Verificou-se que a maior dispersão de dados foi registrada com carvão menos denso com coeficiente variação de 17,07%, seguido de 8,3% e 8,54% para carvões de média e alta densidade, respectivamente.

Gráfico 5 – Densidade relativa aparente de carvão por grupo de densidade



Fonte: Autor (2025).

Lima et al. (2022) ao carbonizarem três madeiras tropicais: *Licania* sp. (Casca-seca) com densidade de 0,881 g/cm³, *Caryocar* sp. 2 (Pequiarana) com 0,701 g/cm³ e *T. guianensis* (Tapiririca) com 0,397 g/cm³, seguindo nessa ordem das espécies citadas, carvões produzidos apresentaram DRAp de 0,690 g/cm³, 0,408 g/cm³ e 0,254 g/cm³, confirmando-se que madeira

pesada tende a gerar carvão denso. Em outro trabalho, Lima et al. (2020) é mencionado de que carvões produzidos com resíduos madeireiros na Amazônia apresentaram uma faixa de DRAp de 0,423 a 0,620 g/cm³.

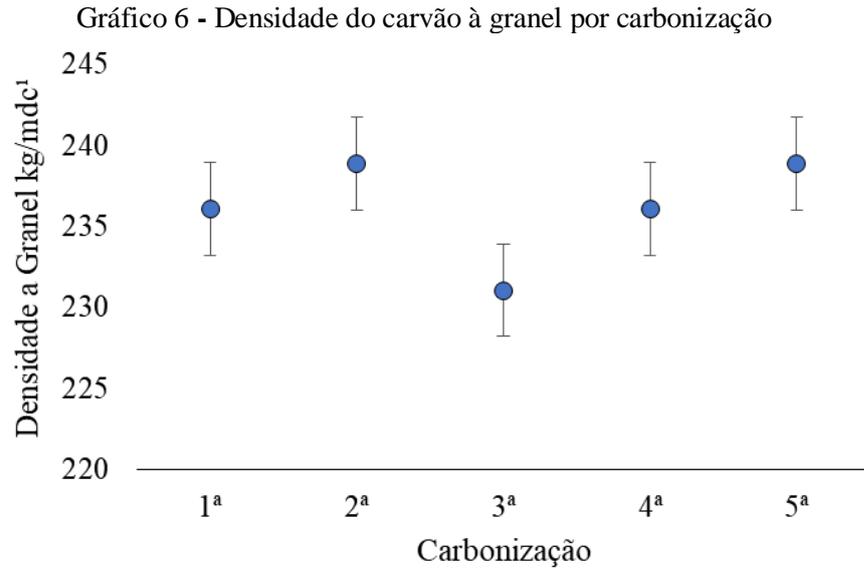
Os resultados encontrados neste trabalho e os valores dos autores citados confirmam que a DRAp do carvão vegetal é diretamente influenciada pela densidade da madeira da qual ele é derivado. Essa relação varia entre as diferentes espécies de madeira e condições de carbonização.

Na questão qualitativa do carvão, segundo Assis et al., (2016), o menor valor de DRAp recomendado para uso em produção de aço é de 0,250 g/cm³. Sendo assim, o carvão produzido com resíduos florestais no forno metálico pesquisado, apresenta-se adequado para ser utilizado na indústria siderúrgica.

8.3 Densidade à granel do carvão (DG)

A média da densidade a granel (DG) do carvão vegetal produzido a partir de resíduos de exploração florestal foi de 236,2 kg/mdc¹, com variação entre 231,1 e 238,9 kg/mdc¹, o que indica uma pequena variação entre os valores (Coeficiente de Variação = 1,2%) (Gráfico 6). A baixa variação na DG pode ser explicada por alguns fatores, como a composição das espécies que formam o grupo de resíduos. Diferentes espécies de madeira apresentam variações em densidade, mas quando misturadas para a produção de carvão, essas diferenças tendem a se equilibrar, resultando em uma DG mais uniforme.

Os fornos metálicos geralmente permitem um controle mais preciso da temperatura e do tempo de carbonização, o que resulta em uma carbonização mais uniforme e eficiente. Isso pode levar a uma produção de carvão com partículas mais uniformes em termos de tamanho e compactação, o que aumenta a DG do carvão.



Fonte: Autor (2025).

A carbonização de resíduos de manejo florestal realizada por Teleken et al. (2022) apresentou densidades a granel do carvão variando entre 265,33 e 326,15 kg/m³. No presente estudo, os valores foram ligeiramente inferiores aos resultados de Teleken, o que indica que a densidade a granel do carvão pode ser influenciada por diversos fatores. Isto demonstra que a densidade do carvão a granel pode ser influenciada pela densidade da madeira, pelas dimensões e pelos formatos das peças a carbonizar, entendendo como variáveis que influenciam no peso e na quantidade de carvão dentro do recipiente, conseqüentemente, fazendo variar a densidade do carvão a granel (kg/mdc). Madeiras mais densas tendem a produzir carvão mais compacto, aumentando a densidade a granel, enquanto madeiras menos densas geram carvão com maior porosidade e menor densidade a granel.

O estudo apresentado por Garcia (2013) demonstrou que a densidade a granel aumenta conforme o tamanho das partículas de carvão diminui, pois os espaços vazios entre as partículas são minimizados. Isso explica porque carvões com partículas menores tendem a ter uma DG mais alta. Já Raad (2017) aponta que o carvão vegetal destinado às indústrias siderúrgicas deve ter DG superior a 180 kg/m³, para garantir qualidade e eficiência no processo produtivo. Portanto, os valores encontrados neste estudo estão acima desse limite mínimo, o que indica que o carvão produzido é adequado para uso na siderurgia, a densidade a granel apresentada é suficiente para atender às exigências desse setor, refletindo uma boa qualidade do carvão produzido a partir dos resíduos de manejo florestal.

Além disso, como o forno metálico permite um processo de carbonização mais eficiente, a perda de massa durante o processo é menor, o que também pode influenciar positivamente na

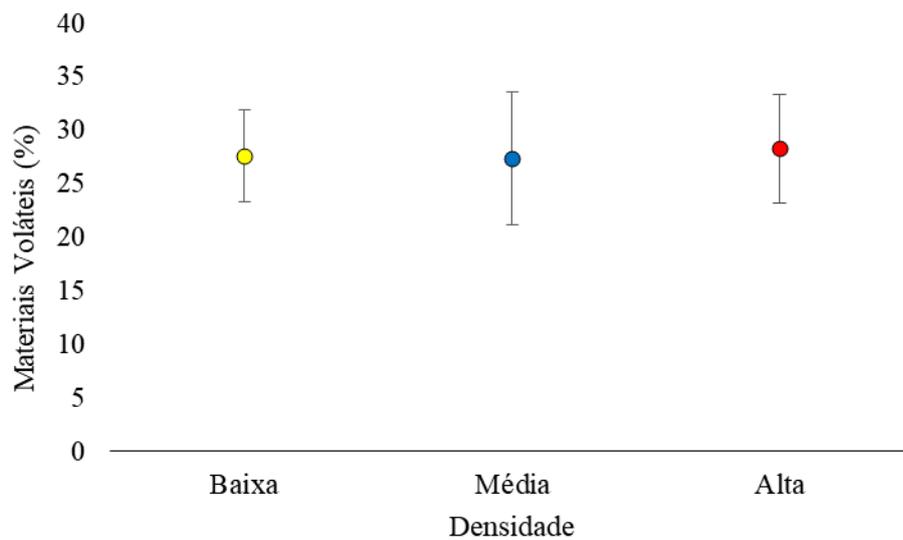
DG. Portanto, o uso do forno metálico contribui para a maior consistência e valores mais elevados de DG em comparação a outros tipos de forno, devido ao controle mais rigoroso do processo de carbonização.

9. Características químicas do carvão

9.1 Teor de materiais voláteis (TMV)

No Gráfico 7, encontram-se os resultados estatísticos do Teor de Materiais Voláteis (TMV) contidos no carvão. As médias encontradas nos três grupos de densidade baixa, média e alta foram de $27,62\% \pm 18,35$, $27,42\% \pm 38,47$ e $28,29\% \pm 26,02$, não houve diferença estatística significativa entre as médias, respectivamente. Ressalte-se que os elevados valores de coeficientes de variação (15,51%, 22,62%, 18,03%) dos carvões produzidos indicam grande dispersão dos dados.

Gráfico 7 - Teor de Materiais Voláteis (TMV) no carvão por grupo de densidade



Fonte: Autor (2025).

Teleken et al. (2022) verificaram que os carvões produzidos com resíduos de manejo florestal sustentável na Amazônia, com densidade inferior a 750 kg/m^3 apresentaram maior teor de matérias voláteis, com média de 26,51%. Em contraste, os carvões com densidade igual ou superior a 750 kg/m^3 tiveram a menor média de 22,31%.

Barros et al. (2023) no estudo realizado sobre a qualidade de carvão produzido com resíduos de madeira amazônica de diferentes densidades, coletadas na mesma região deste trabalho, indicaram variações no teor de materiais voláteis entre 28,05% e 38,15% na base seca.

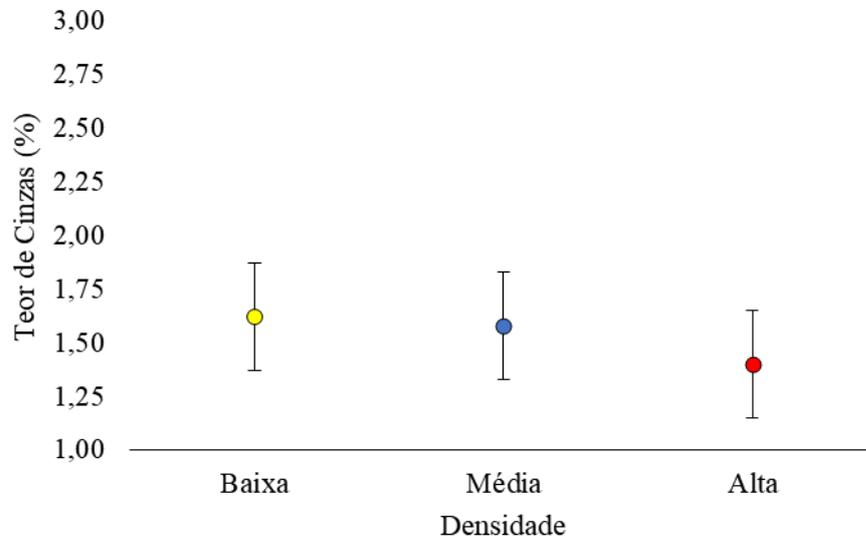
Os teores de materiais voláteis no carvão vegetal produzido a partir de madeiras da Amazônia variam consideravelmente conforme a espécie e as condições de carbonização. Estudos realizados com *Manilkara amazônica* (maçaranduba), *Lecythis pisonis* (sapucaia) e *Piptadenia suaveolens* (timborana), indicaram teores de materiais voláteis entre 23,94% e 31,47%, influenciado pela duração da carbonização de 7 a 10 dias, em forno tipo rabo-quente (Silva et al., 2006).

Quando se relaciona uso do carvão vegetal, o TMV deve ser observado, em especial, como redutor de minérios em indústrias siderúrgicas, pois quanto maior o TMV no carvão, significa que tem um menor teor de carbono fixo, elemento químico responsável pela redução do minério bruto. Segundo Assis et al. (2016), o teor de materiais voláteis deve variar entre 20% e 25% para uso na produção de aço, pois valores acima dessa faixa, promove também a redução do teor de carbono fixo o que diminui a eficiência do carvão como redutor em altos-fornos. O ideal é que o carvão vegetal apresente uma menor porcentagem de voláteis e elevado teor de carbono fixo que possibilita uma maior eficiência no processo (Lins et al., 2020). Santos et al. (2011) corroboram com o argumento de que o elevado teor de voláteis no carvão pode comprometer a eficiência do carvão como redutor nas operações siderúrgicas.

9.2 Teor de cinzas (TCi)

No Gráfico 8, o teor de cinzas (TCi) contido no carvão verificou-se que não houve diferença estatística entre as médias, a qual maior média foi de $1,62\% \pm 0,26$ encontrado em carvão de média densidade, seguindo-se em ordem decrescente, médias de $1,59\% \pm 0,22$ em carvão de menor densidade e de $1,40\% \pm 0,26$ em carvão de maior densidade. O teor de cinzas reflete a quantidade de material inorgânico residual após a combustão do carvão.

Gráfico 8 - Teor de cinzas contido no carvão por grupo de densidade



Fonte: Autor (2025).

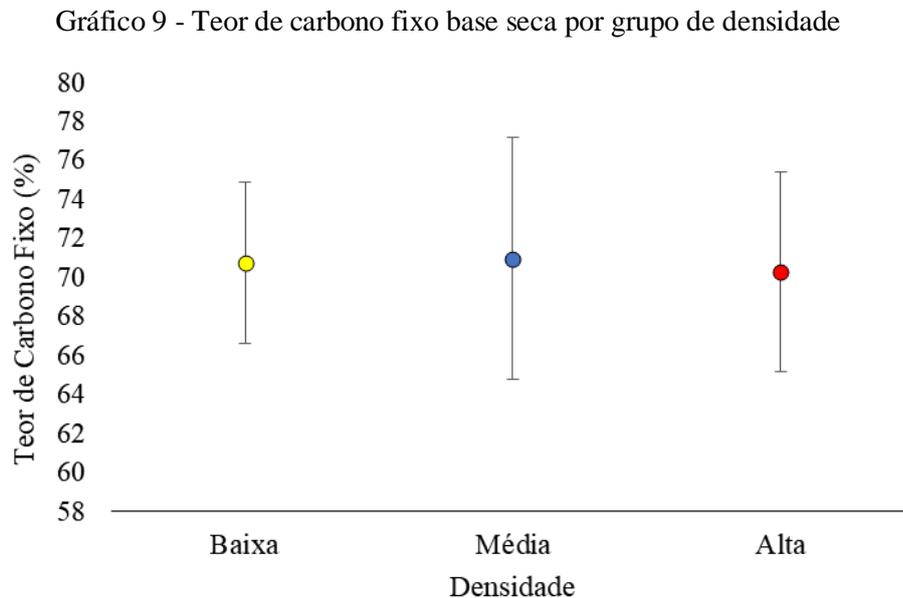
Madeiras de baixa densidade frequentemente contêm uma maior proporção de componentes minerais e extrativos, segundo, Soares et al. (2014), os quais são transferidos para o carvão durante o processo de carbonização. Madeiras mais densas têm uma estrutura mais compacta, o que pode limitar a disponibilidade de minerais que contribuem para a formação de cinzas durante a combustão (Magalhães et al., 2023). Minerais como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) são reduzidas em madeiras mais densas, ocasionando a uma menor produção de cinzas (Dzurenda & Pňakovič, 2016).

Estudo realizado por Lima et al. (2020) sobre carbonização de resíduos madeireiros na Amazônia indicou teor de cinzas variando de 0,5% a 9,6% para carvão com densidade aparente entre 0,423 e 0,620 g/cm³, respectivamente. Fortaleza (2019), ao avaliar as propriedades do carvão vegetal de resíduos florestais das espécies *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. (Envirão), *Guatteria* sp. (Samaúma), *Brosimum* sp. (Mumuré) com densidade aparente variando de 0,2628 a 0,3173 g/cm³, obtiveram valores médios de teor de cinzas entre 0,22 e 2,5 %. No presente trabalho, a variação de cinzas no carvão vegetal produzido em forno metálico foi menor, situaram-se entre 1,40% e 1,62%, apresentando variações dentro do limite encontrado pelos autores mencionados.

Essa variável pode influenciar na qualidade energética do carvão. Loureiro et al. (2021) e Brand (2010), afirmam que à medida que aumenta o teor de minerais no carvão, o poder calorífico se reduz, uma vez que os minerais não participam da combustão, mas são contabilizados na massa do combustível.

9.3 Teor de carbono fixo (TCF)

No Gráfico 9, encontram-se os resultados estatísticos de teor de carbono fixo (TCF) em base seca para o carvão vegetal produzido em forno metálico, considerando diferentes grupos de densidade de madeira (baixa, média e alta densidade). Os dados mostram valores médios de 70,75% \pm 4,21 (para carvão de baixa densidade), de 70,99% \pm 6,21 (para carvão média densidade) e de 70,31% \pm 5,15 (para carvão com alta densidade). Não houve variação indicando que a densidade do carvão não tem um impacto significativo sobre o TCF. Os coeficientes de variação (CV) indicaram que a menor dispersão dos dados correspondeu ao grupo de carvão menos denso com coeficiente de variação de 5,86%, seguido por 8,71% e 7,27% para carvões de média e alta densidade, respectivamente.



Fonte: Autor (2025).

Quanto a teor de carbono fixo base úmida, os valores encontrados também foram bastante próximos, registrando-se para o grupo de carvão com menor densidade, a média encontrada foi de 65,61% \pm 4,06, densidade intermediária de 66,55% \pm 6,30 e de maior densidade de 65,85% \pm 5,20 de teor de carbono fixo. Esses valores mostram uma ligeira queda em relação à base seca, como esperado, devido à presença de umidade.

A variável grupo de densidade da madeira utilizada para a produção do carvão não causou grandes diferenças no conteúdo de carbono fixo. Isso sugere que o fator determinante, possivelmente, foi decorrente da variável do processo de carbonização correspondente à

temperatura interna do forno, uma vez que o teor de carbono fixo está associado a composição química como umidade, materiais voláteis e cinzas contidos no carvão.

Lima et al. (2020), em estudo sobre a qualidade e adequação de carvões produzidos a partir de resíduos abundantes de exploração madeireira de manejo florestal sustentável na Amazônia, observaram que em carvão vegetal com densidade aparente de (0,423 a 0,620 g/cm³), o teor de carbono fixo base úmida variou de 67,2% a 75,3%, resultado não muito diferente dos dados encontrados neste estudo. Quanto a teor de carbono fixo base seca, esses autores encontraram valores variando de 73% a 67,2% para carvão com densidade aparente de 0,472 a 0,620 g/cm³, respectivamente.

No aspecto de utilização do carvão em siderurgia, segundo Radd (2017), a faixa desejada de carbono fixo deve estar compreendida entre 70 % e 80 %. Silva e Ataíde, (2019) argumentam que carvão vegetal com alto TCF é recomendado para a indústria siderúrgica devido à maior estabilidade térmica e à maior capacidade de fornecer energia na forma de calor. Altas proporções de TCF têm impacto positivo na produtividade dos altos-fornos siderúrgicos (Pereira et al., 2012).

Existe uma relação inversa e proporcional entre materiais voláteis e carbono fixo, quanto maior for a exposição ao calor, mais elementos gasosos são despreendidos da madeira e, conseqüentemente, ocasionando aumento na concentração da fração sólida (carbono fixo) (Teleken et al., 2022).

Dessa forma, os carvões produzidos com resíduos de exploração florestal apresentaram valores médios que podem ser consideradas adequadas para esse fim.

10. Característica energética do carvão

Na Tabela 2, encontram-se os resultados estatísticos de Poder Calorífico Superior (PCS) do carvão produzido com grupos de carvão de resíduos de exploração florestal.

Tabela 2 - Resultados estatísticos de poder calorífico superior do carvão, por grupo de densidade

Carbonização	Grupo de densidade do carvão		
	Baixa	Média	Alta
	Poder calorífico superior (kJ/kg)		
1ª fornada	28.469,65	27.930,0	27.890,5
2ª fornada	28.925,04	28.925,0	29.331,1
3ª fornada	30.090,43	29.380,6	30.731,5
4ª fornada	28.635,87	28.855,6	28.441,0
5ª fornada	30.436,84	31.605,0	29.894,5

Média	29.311,56	29.339,26	29.257,72
VAR.P	637.533,1241	1.505.302,82	1.023.899,00
DP	798,46	1226,91	1011,88
CV	2,72	4,18	3,46

VAR.P= Variância; DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação

Fonte: Autor (2025).

O carvão do grupo de baixa densidade valores encontrados foram entre 28.469,65 e 30.436,84 kJ/kg, com média de 29.311,56 kJ/kg, registrando baixo coeficiente de variação de 2,72%. Para o grupo de densidade média, valores entre 27.930,0 e 31.339,26 kJ/kg, com média de 29.339,26 kJ/kg e coeficiente de 4,18% e, finalmente, o grupo de alta densidade, valores entre 27.890,5 e 29.894,5 kJ/kg, com média de 29.257,72 kJ/kg e coeficiente de variação de 3,46%. Os baixos valores de coeficientes de variação, indicam pequena dispersão dos dados obtidos, refletindo em boa consistência dessa variável. Não houve diferença estatística entre as médias de poder calorífico superior entre os três grupos, pois não está associado com a densidade e sim com a composição química, além disso, atribuindo-se à eficiência da carbonização em forno metálico, o que resultou em um produto final com propriedades energéticas similares, independentemente da madeira que deu origem e do carvão obtido. Certamente, pela pouca variação de temperatura no interior do forno nas cinco carbonizações efetuadas, gerando valores muito próximos de materiais voláteis e carbono fixo, componentes químicos responsáveis no aspecto energético do carvão.

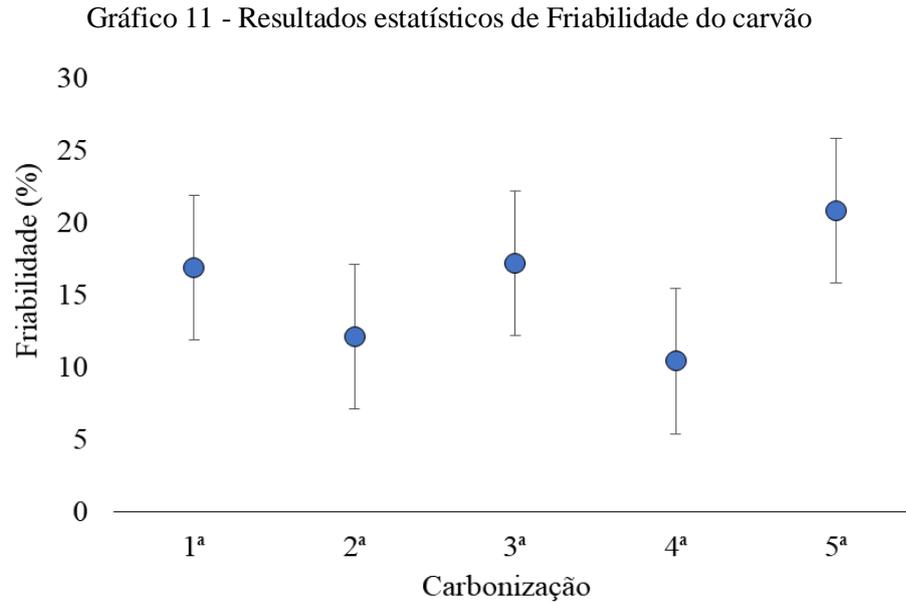
Segundo Teleken et al. (2022), o poder calorífico superior do carvão vegetal de resíduos de área de Manejo Florestal variou entre os grupos de madeira. O maior valor para o grupo de madeiras de alta densidade ($>750 \text{ kg/m}^3$), com TMV de 22,31%, TCF a 76,64% e TCi com 0,52%, obteve PCS de $7.378 \text{ kcal.kg}^{-1}$ equivalendo a $30.869,55 \text{ kJ/kg}$, em grupo de madeiras de densidade inferior a ($<750 \text{ kg/m}^3$), com TMV de 26,51%, TCF a 70,75% e TCi com 2,62%, houve redução no PCS com $7.071 \text{ kcal.kg}^{-1}$ equivalendo a $29.585,06 \text{ kJ/kg}$. Lima et al. (2020a) destacaram variações relevantes para diversas propriedades do carvão vegetal produzido a partir dos mesmos resíduos, como densidade relativa aparente (0,423 a $0,620 \text{ g/cm}^3$), TMV de (23,2 a 26,4%) e TCF de (73,1 a 67,2%) que apresentou variação no PCS de 27,8 a $30,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

As informações dos autores citados anteriormente estão relacionadas a carvão vegetal produzido em escala laboratorial, exigindo investigação conclusiva sobre o desempenho da carbonização de resíduos de exploração madeireira sob condições operacionais na Amazônia, em fornos convencionais de alvenaria ou outros modelos de fornos. Brand (2010) corrobora

que o poder calorífico pode variar de acordo com a composição química do carvão (teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas). Os valores encontrados por esses autores foram levemente superiores aos que encontrados neste estudo, certamente, influenciados pela composição química do carvão referentes a teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas.

11. Característica mecânica de Friabilidade

No Gráfico 11, encontram-se os resultados estatísticos da propriedade mecânica denominada de friabilidade do carvão, que consiste na resistência à fragmentação devido a atrito e choques sofridos durante o manuseio e transporte. As amostras de carvão obtidas de cada carbonização apresentaram grande variação de friabilidade, não havendo separação de densidade, essa variação existe devido a quantidade de espécies diferentes sendo utilizadas, cada uma com seu próprio arranjo estrutural de células. Foi Registrado o menor valor médio de 10,45% para o carvão da 4ª carbonização e o maior de 20,88% na 5ª. Os largos valores de coeficientes de variação (5,12% a 15,68%) indicam forte dispersão dos dados. Os carvões produzidos na 2ª e na 4ª carbonização foram os mais resistentes à fragmentação, registrando-se nessa ordem, 12,13% e 10,45% de friabilidade.



Fonte: Autor (2025).

Barros et al. (2023), em estudo sobre segregação de resíduos de madeira da Amazônia para melhorar a qualidade do carvão, os valores médios variaram de 21,8 a 24,9%, usando a mesma metodologia adotada neste trabalho. Seguindo a classificação de friabilidade do Centre Technique Florestier Tropical – CTFT, (1975): Muito alta (>30%); Alta (25 a 29%); Média (15 a 24%); Baixa (10 a 15%) e Muito baixa (<10), sendo os carvões produzidos na 2ª e na 4ª carbonização apresentando baixa friabilidade e os demais medianamente friáveis. Essa variação pode ser decorrente de variações internas de carbonização (diferentes fluxo e intensidade de calor), bem como diferentes espécies e umidade da madeira, variáveis que podem gerar carvão com maior ou menor propensão à formação de rachaduras ou fissuras, tornando o carvão menos resistente à fragmentação.

Martínez et al. (2020); Dufourny et al. (2019) corroboram que a friabilidade é uma propriedade que infere na resistência mecânica do carvão à propensão de fragmentação em frações menores (partículas) pela ação combinada de abrasão e choques durante o manuseio. Autores como Assis et al. (2016); Dufourny et al. (2019); Silva et al. (2019) e Canal et al. (2020), mencionam que há vários fatores que influenciam na geração de finos, tais como, diâmetro do tronco, umidade da madeira, temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e taxa de resfriamento. Barros et al. (2023) argumentam que a influência desses fatores resulta em carvão vegetal com diferentes propriedades físicas, mecânicas e térmicas.

Fortaleza et al. (2019) afirmam que carvão com maior densidade, tende a aumentar a resistência mecânica do carvão, característica importante, especialmente, quando o uso do produto for para fins siderúrgicos.

A baixa resistência mecânica do carvão, segundo a CTFT e Assis et al. (2016), pode resultar em produção acentuada de finos devido à compactação e abrasão que o termo redutor é submetido. Raad (2017) relata que o carvão vegetal direcionado à indústria siderúrgica deve apresentar a menor quantidade de geração de finos possível. Nesse contexto, os resultados obtidos com os carvões produzidos com resíduos de exploração florestal, apresentam-se adequado para ser usado em indústria siderúrgica.

12. Avaliação quantitativa do processo de carbonização

Na Tabela 5, encontram-se os resultados estatísticos de Coeficientes de Rendimento Volumétrico (CRV) e Rendimento Gravimétrico (CRG) e os Coeficientes de Conversão Volumétrico (CCV) e Conversão Gravimétrica (CCG) de resíduos, em carvão.

Tabela 5 - Resultados estatísticos de Coeficientes de Conversão e de Rendimento de resíduos em carvão

Carbonização	CRV (%)	CRG (%)	CCV (R/CV) m ³ /mdc	CCG (R/CV) t/t
1	43,7	32,7	1,291	3,058
2	47,4	36,1	1,280	2,772
3	22,6	26,8	1,662	3,726
4	36,9	26,8	1,337	3,736
5	37,3	33,7	1,635	2,963
Média	37,6	31,2	1,441	3,251
VAR	71,4575	14,2320	0,0292	0,1620
DP	8,4533	3,7725	0,1709	0,4025
CV (%)	22,5	12,1	11,9	12,4

VAR = Variância; DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação; CRV = Coeficiente de Rendimento Volumétrico; CRG = Coeficiente de Rendimento Gravimétrico; CCV = Coeficiente de Conversão Volumétrica; CCG = Coeficiente de Conversão Gravimétrica

Fonte: Autor (2025).

A carbonização de resíduos de exploração florestal no forno metálico com injeção de gases quentes apresentou Coeficiente de Rendimento Volumétrico (CRV) entre 22,6% e 47,4%, com média de 37,6%. O coeficiente de variação de 22,5%, considerado elevado, indica uma grande dispersão na relação entre os dados de volume de resíduos enfiados e o volume de carvão produzido.

O Coeficiente de Rendimento Gravimétrico (CRG) se apresentou entre 26,8% e 36,1%, com média de 31,2%, registrando-se um coeficiente de variação de 12,1%, sugerindo uma razoável dispersão na relação dos dados de peso de carvão produzido e peso de resíduos enfiados.

Essas variações nos CRV e CRG podem ocorrer devido a fatores intrínsecos à matéria-prima, tais como, teor de umidade da madeira, diferentes dimensões dos resíduos e de variadas espécies autorizadas para exploração dentro do Plano de Manejo Florestal e fatores intrínsecos às operações da carbonização, correspondentes a fluxo e distribuição de calor no interior do forno e carregamento de mix de resíduos com diferentes características, fazendo variar os resultados dos processos de conversão e de rendimento na produção de carvão.

O CRG obtido neste estudo foi superior aos que encontraram Teleken et al. (2022) com resíduos de manejo florestal, cujos valores médios variaram de 19,81 a 24,38%. Essa variação no rendimento gravimétrico do carvão vegetal é atribuída pelos autores, a inúmeros fatores, tais como, densidade da madeira, umidade, dimensões da madeira, entre outros. Lima et al. (2023) relataram que em forno convencionais apresentou um CRG de carvão de 20,1% em carbonização com 23 espécies de plano de manejo. O valor médio encontrado por esses autores foi bem inferior ao obtido neste estudo com forno metálico, mesmo trabalhado com a mesma heterogeneidade de espécies. O forno metálico com melhor controle e eficiência de fluxo de gases quentes, conseqüentemente, melhor distribuição de calor no interior do forno, pode ter favorecido a melhor conversão da madeira em carvão.

Quanto a Coeficiente de Conversão Volumétrica (CCV) que expressa a relação entre o volume de resíduos (m^3) e o volume de carvão (mdc), registrou-se valores entre 1,280 e 1,662 m^3 /mdc, com média de 1,441 m^3 /mdc. O coeficiente de variação de 11,9%, indica pouca dispersão entre os dados de volume de resíduos enfiados e volume de carvão obtido.

No que concerne a Coeficiente de Conversão Gravimétrica (CCG) que determina a relação entre o peso (t) de resíduos e peso (t) de carvão, expresso em porcentagem, registrou-se valores entre 3,726 e 3,736 t de resíduos para 1t de carvão produzido, com média de 3,251 t/t. O coeficiente de variação registrou valor de 12,4%, considerado dispersão moderada entre os dados de peso de resíduos e de carvão.

As diferentes espécies com características distintas (teor de umidade e diferentes densidade da madeira) dentro do forno e as condições operacionais de carbonização com melhor controle de distribuição de energia (temperatura) podem ter sido os fatores que influenciaram sobre os CCV e CCG, uma vez que essas variáveis são bastante distintas entre as cargas do

forno que foram feitas de forma totalmente aleatória sem segregação de densidade dentro do forno.

Lima et al. (2023) verificou que o volume de resíduos de exploração florestal necessário para produzir 1 tonelada de carvão vegetal em forno convencional foi de 5,39 m³ de resíduos, obtendo-se um coeficiente de conversão volumétrica (CCV) de 1,48 m³ de resíduos para 1mdc de carvão vegetal. Isso significou que, em fornos convencionais, foi necessário um maior volume de resíduos para gerar a mesma quantidade de carvão. Segundo os autores, fatores como a densidade básica ponderada dos resíduos, o teor de umidade e a massa seca influenciaram diretamente os resultados do CCV.

No presente estudo, o forno metálico apresentou o CCV de 1,441 m³ de resíduos para 1 metro cúbico de carvão, mostrando uma conversão mais eficiente em comparação ao forno convencional. Essa diferença se deve a maior controle e eficiência no processo de carbonização em forno metálico, permitindo uma carbonização mais uniforme, promovendo menor perda de massa e maior aproveitamento dos resíduos. Além disso, a maior densidade básica ponderada nos fornos metálicos também contribuiu para a redução no volume de resíduos necessários, tornando o processo mais eficiente em termos volumétricos.

Segundo Canal et al. (2014), o teor de umidade da madeira é um dos principais fatores que afetam o rendimento em fornos de combustão parcial, pois parte da madeira no interior do forno é queimada para eliminação da água, reduzindo, assim, o rendimento em relação ao carvão produzido. Os diferentes sistemas de carbonização e as características da madeira utilizada como matéria-prima também determinam o rendimento do processo de conversão da madeira, influenciando sobre as propriedades do carvão vegetal (Oliveira et al., 2019). Não foram encontrados em literaturas, estudos específicos sobre CCV e CCG de resíduos de exploração florestal para carvão vegetal, produzido em fornos metálicos.

13. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos no presente estudo, pode-se inferir as seguintes conclusões:

O carvão produzido em forno metálico com injeção de gases quentes evidenciou a influência significativa das características físicas correspondentes a teor de umidade e densidade da madeira de resíduos de exploração florestal, no processo de carbonização.

O carvão de resíduos quando exposto ao meio ambiente, tipicamente da Fazenda Rio Capim, local onde foi desenvolvido o trabalho, apresentou baixa umidade. Identificou-se uma relação inversa entre densidade da madeira e teor de umidade.

As características químicas do carvão proporcionaram, sob o aspecto qualitativo, um material energético potencial para uso siderúrgico, especialmente, pelo baixo teor de cinzas e adequado teor de carbono fixo.

A técnica de injeção de gases quentes promoveu a transferência de calor com maior mais eficiência em todo interior do forno, induzindo a rápida e menor tempo de carbonização, em comparação às técnicas tradicionais de forno de alvenaria.

O agrupamento por densidade de madeira, combinado com o controle rigoroso dos parâmetros do forno metálico, permite otimizar a qualidade energética e o rendimento na produção de carvão.

O carvão vegetal indicou boa resistência mecânica, formando poucas partículas, classificando-se entre pouco e medianamente friável.

Um sistema de pré-secagem da madeira antes do processo de carbonização deve ser adotado, visando a melhoria na conversão de resíduos em carvão, visto que essa variável influencia no tempo de carbonização, podendo afetar negativamente a performance do forno quanto a questão de rendimento e características qualitativas do carvão.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8740**: Carvão vegetal - Determinação do índice de quebra e abrasão - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985.

ANTAL, M.; GRONLI, M. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. v. 42, p. 1619-1640, 2003.

ARRUDA, T. P. M. de; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; ACOSTA, F. C. **Evaluation of two carbonization routines in rectangular kilns**. *Revista Árvore*, v. 35, p. 949-955, 2011, Viçosa-MG. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500020>. Acesso em: 8 set. 2024.

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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6>.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 11491** - Determinação da Densidade Básica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: Carvão vegetal - ensaios físicos -determinação da massa específica do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1981.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **D5868 2013**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, 2013.

BARCELLOS, D. C. A Fábrica de Carvão Ecológico do Futuro: Como Será?. **Fórmula Da Carvoaria Perfeita**, p. 1-31, 2016.

BARROS, D. de S.; LIMA, M. D. R.; DIAS JUNIOR, A. F.; BUFALINO, L.; MASSUQUE, J.; SANTOS, E. V. dos; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, F. de A.; PROTÁSIO, T. de P. Does the segregation of wood waste from amazonia improve the quality of charcoal produced in brick kilns? **BioEnergy Research**, v. 16, p. 1604–1617, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10551-w>.

BENITES, V. DE M., & PIMENTA, W. G. T. M. E. R. A. S. (2014). Utilização de Carvão e Subprodutos da Carbonização Vegetal na Agricultura : Aprendendo com as Terras Pretas de Índio. Embrapa Amazônia Ocidental-Capítulo. Em Livro Científico (ALICE), 285–296. http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=5&Itemid=8

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional 2019: ano base 2018. 12. ed. Rio de Janeiro, 2019.

BRAND, M. A. Energia de Biomassa Florestal. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p.

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois**. AixenProvence: ÉDISUD, 1985. 180 p.

BRUZUAL, C. F. Assessment of CO₂ mitigation potential, biomass use and plantation areas to sustain charcoal-ironmaking. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 325-334, out/dez. 2015.

CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; SANTOS, R. C. **Treinamento carvão vegetal: apostila teórica e prática**. Viçosa-MG, 2011. 129p.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; LIMA, J. E.; SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária**, Brasília, v. 48, n. 6, p. 627-635, 2014.

CANAL, W. D. et al. Influência da Umidade da Madeira nas Propriedades do Carvão. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M.; FIGUEIRÓ, C. G. et al. Impact of wood moisture in charcoal production and quality. **Floresta e Ambiente**, v. 27, p. 1–7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.099917>. Acesso em: 14 out. 2024.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia. Brasília: CGEE, 2015. 150p. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Carvao_Vegetal_WEB_02102015_10225.PDF/a3cd6c7c-5b5b-450a-955b-2770e7d25f5c?version=1.3. Acesso em: 8 set. 2024.

COUTO, A. M.; MONTEIRO, T. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M.; NAPOLI, A.; ALMEIDA, D. P. Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical–mechanical properties. **Journal of Forestry Research**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01462-9>.

CHARVET, F.; MATOS, A.; SILVA, J. F. da; TARELHO, L.; LEITE, M.; NEVES, D. **Charcoal production in Portugal: operating conditions and performance of a traditional brick kiln**. *Energies*, v. 15, p. 4775, 2022, Santiago, Portugal. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15134775>. Acesso em: 8 set. 2024.

DONATO, D. B.; MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S.; W. C. CANAL.; SILVA, M. L. Viabilidade econômica de diferentes sistemas de produção de carvão vegetal em escala industrial. **Ciência da Madeira**. v. 8, n. 3, p. 143-149. 2017.

DU, S.; CHEN, W.; LUCAS, J. A. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. **Bioresource Technology**, v. 161, p. 333-339, 2014.

DUFOURNY, A.; VAN DE STEENE, L.; HUMBERT, G. et al. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.013>. Acesso em: 14 out. 2024.

DZURENDA, LADISLAV; PŇAKOVIČ, ĽUBOMÍR. Influence of the burning temperature of the non-volatile combustible content of wood and bark of plantation-grown, fast-growing tree species upon ash production, and its properties in terms of fusibility. **Bioresources**, v. 11, n. 3, p. 6464-6476, 2016. DOI: 10.15376/BIORES.11.3.6464-6476.

EPE. ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2021: Ano base 2020. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2021. 268 p.

FAO, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. 2017 Wood Energy. Disponível em: <http://www.fao.org/forestry/energy/en/>. Acesso em: 20 jan. 2024.

FERREIRA, L. R. A.; OTTO, R. B.; SILVA, F. P.; DE SOUZA, S. N. M.; ANDO JUNIOR, O. H. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 440- 455, 2018.

FORTALEZA, A. P.; NASCIMENTO, J. J. P. F.; 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. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509831639>

FOELKEL, C. E. B. Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas. In: Eucalyptus **Online Book & Newsletter**, 2016.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 24, n. 135, p. 14-16, 2013.

GOMES, P. A; OLIVEIRA, J. B. de. **Teoria da Carbonização da Madeira. in: Uso da Madeira para Fins Energéticos**. Fundo Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. Belo Horizonte, 1982. lv. (SPT - 1.) 27-42p.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual IBÁ 2023**. Disponível em: < <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf> > .

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS)**. Rio de Janeiro: IBGE. 2022. Disponível em: 45 <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-da-silvicultura.html?=&t=resultados>.

KUMAR, J. A.; KUMAR, K. V.; PETCHIMUTHU, M.; IYAHRAJA, S.; KUMAR, D. Vignesh. Comparative analysis of briquettes obtained from biomass and charcoal. **Materials Today: Proceedings**, p. 1-5, mar. 2020.

LIMA, M. D. R.; BUFALINO, L.; SCATOLINO, M. V.; HEIN, P. R. G.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; PROTÁSIO, T. P. Segregation of residues from logging in the Amazon from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. *Renewable Energy*, v. 211, p. 772-788, 2023.

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, 2020.

LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; BARROS JUNIOR, 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, 2020. p. 105660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105660>.

LIMA, E. A. C.1.; SATTTLER, A. B.; SANTOS, L. K. B.; JANSEN, D. C.; CORRÊA, V. M. Determinação do teor de umidade e densidade básica para madeira de *Cariniana micrantha* Ducke baseado na norma da ABNT NBR 7190- 3/2022. *Conjecturas*, ISSN: 1657-5830, Vol. 22, Nº 18, 2022.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; TUSSOLINI, E. L. **Potencial do Eucalyptus benthamii para produção de carvão vegetal em fornos convencionais**. Colombo, PR. ISSN: 1980-3982, agosto, 2012.

LINS, T. R. S.; BRAZ, R. L.; SOUZA JUNIOR, C. G. C., CORREIA, H. T. V.; SILVA, T. C.; WALTER, L. S. Rendimento e caracterização do carvão vegetal de galhos de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. *BIOFIX Scientific Journal* v. 5 n. 1, p. 39-43, 2020.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I.I.C. N. A.s de; OLIVEIRA, Ana Flávia Fernandes de; TRUGILHO, Paulo Fernando. Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp* para uso industrial. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 214-232, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509836120>.

MAGALHÃES, M. R. R.; BARAÚNA, E. E. P.; SANTOS, P. L; SANTOS, V. B; ERIKA S.; DIAS, T. L; BALDIN, T.; PEREIRA, H. Relationship of extractive content, ash and basic density of wood to the attack of termites *Nasutitermes* sp. *Contribuciones a las ciencias sociales*, v. 16, n. 8, 2023. DOI: 10.55905/revconv.16n.8-118.

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*, v. 13, p. 15789–15798 2021.

MARQUES, S. S.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, E. S.; SILVA, A. G.; FIEDLER, N. C. Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de pau-brasil (*Caesalpinia chinata* LAM.) nativa e de reflorestamento. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 36 n.2, p. 373-380, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622012000200019>.

MARTÍNEZ, M. G.; FLOQUET, P.; DUPONT, C. et al. Assessing the impact of woody and agricultural biomass variability on its behaviour in torrefaction through Principal Component Analysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 134, p. 105474, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105474>. Acesso em: 14 out. 2024.

MEDEIROS, D. T.; MELO, R. R.; CADEMARTORI, P. H. G.; BATISTA, F. G.; MASCARENHAS, A. R. P. Caracterização da madeira de espécies da Amazônia. **Madera y Bosque**. vol. 27, n. 2, 2021, Piracicaba, São Paulo, doi: 10.21829/myb.2021.2722209.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. Produção sustentável de carvão vegetal: **Manual de operação de sistema fornos-fornalha**. Brasília, DF: MMA, 2019.

MORAIS, S. A. L. de.; NASCIMENTO, E. A. do.; MELO, D. C. de. Análise da madeira de Pinus oocarpa parte I: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461–470, 2005.

MOUTINHO, V. H. P. et al. Characterization and statistical correlation between charcoal's physical and mechanical properties of Eucalyptus and Corymbia clones. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 1095-1103, 2017.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. de P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, dez. 2011.

NOGUEIRA, E. M.; NELSON, B. W.; FEARNESIDE, P. M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 208, p. 261–286, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.12.007>.

NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S. 2003. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2.ed. 199pp.

NOGUEIRA, M. F. M. Biomassa Energética: Caracterização da Biomassa. Palestra Proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis – SC 2007.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. (2008). Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord). **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

NUMAZAWA, C. T. D.; NUMAZAWA, S.; PACCA, S.; M. JOHN, V. 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. de C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, E. B. de; PINTO JUNIOR, J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. cap. 26.

OLIVEIRA, R. S.; SILVA, L. F. F.; ANDRADE, F. W. C.; TRUGILHO, P. F.; PROTASIO, T. P.; GOULART, S. L. Qualidade do carvão vegetal comercializado no Sudeste Paraense para cocção de alimentos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-9, 2019

OLIVEIRA, J. T. da S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica em madeiras de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, p. 115–127, 2005.

PELANDA, K. A.; POTULSKI, D. C.; SILVA, D. A.; FERRAZ, F. A. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 6, n. 2, p. 112–121, 2015.

PENEDO, W. R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Fundação CETEC, Belo Horizonte, 1980.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from Eucalyptus clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, p. 1-8, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1155/2012/523025>.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of chemical composition of eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **Bioresources**, Raleigh, v. 8, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, C. A.; et al. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 26, 2016.

PEREIRA, A. A., LIMA, M. D. R., PATRÍCIO, E. P. S., NUMAZAWA, S., GOULART, S. L., & PROTÁSIO, T. P. (2020). Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. **Scientia Forestalis**, 48(127), e3157. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.01>

PICANCIO, A. C. S.; ISABEX, C.; SILVA, M. L.; SALLES, T. T.; RÊGO, L. J. S.; SILVA, L. F.; Controle do processo de produção de carvão vegetal para siderurgia. **Caderno de Administração**, v. 12, p. 1–17, 2018.

PINTO, C. W., BARTH, G., MOLIN, R., SILVA, D. A. D., & PAULETTI, V. (2021). Characterization of oat biomass for energy production. **Revista Caatinga**, 34(3), 537–547. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n305rc>.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A. dos; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A. dos; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Seleção de Clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 015-028, 2013.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; MIRMEHDI, S.; SILVA, M. G. Quality and energetic evaluation of the charcoal made of babassu nut residues used in the steel industry. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, n.5, p.435-444, 2014.

PROTÁSIO, T. P.; LIMA, M. D. R.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; FIGUEIREDO, I. C. R.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34-45, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057>.

PS Market Research. Market Research Reports, Consulting Services: Prescient. Charcoal Market Research Report. 2020. Disponível em < <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/charcoal-market> > Acesso em 12 de janeiro de 2023.

QUIRINO, W. F. **Utilização Energética de Resíduos Vegetais. Brasília: IBAMA/LPF, 2003.**

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S.; Poder Calorífico da Madeira e de Resíduos Lignocelulósicos. **Revista Biomassa & Energia**, v.1, n.2, p. 173-182, 2004.

RAAD, T. J. **Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico: Avaliação de metodologias relevantes para a análise e quantificação da eficiência de cadeias de produção de carvão vegetal.** 2017. Projeto BRA/14/G31 – Produção de Carvão Vegetal de Biomassa Renovável para a Indústria Siderúrgica no Brasil.

RIBEIRO, D. S.; GONÇALVES, A. L.; MELO, C. F.; REIS, A. R. S. Reação da densidade e das propriedades mecânicas de três espécies amazônicas submetidas a ensaio de campo. **Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), Altamira-PA, 10(1): 18-28, 2019. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v10n1p18-28.

RODRIGUES, T.; BARCELLOS, D. C.; BRAGHINI JUNIOR, A. State of the art on development and improvement of slow carbonization kilns for charcoal production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 176, p. 106257, nov. 2023, Santa Catarina.

RODRIGUES, C. K. **Colheita e transporte florestal. Carla Krulikowski Rodrigues.** Curitiba: [s.n.], 2018, 75p.

RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. das C.; SILVA, J. M. L. da; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; GAMA, J. R. N. F.; VALENTE, M. A. Caracterização e classificação dos solos do município de Paragominas, Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2003. 49 p (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 162).

RODRIGUES, T.; BRAGHINI JUNIOR, A. Charcoal: a discussion on carbonization kilns. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. **Journal of Cleaner Production**, v. 143 p. 104-670. 2019.

RODRIGUES, T.; BRAGHINI J, A. Charcoal: A discussion on carbonization kilns. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 143, n., 2019.

ROUSSET, P.; PIRES, A.C.; SABLÓWSKI, A.; RODRIGUES, T. LCA of eucalyptus wood charcoalbriquettes. **Journal of Cleaner Production**, v.19, p.1647-1653, 2011.

ROUSSET, P.; FIGUEIREDO, C.; SOUZA, M.; QUIRINO, W. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, v. 92, p. 1890-1897, 2011.

RStudio Team. RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston, MA: RStudio, PBC (2021). Disponível em: https://scicrunch.org/resolver/RRID:SCR_001905.

SANGSUK, S.; BUATHONG, C.; SUEBSIRI, S. High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production. **Energy for Sustainable Development**, v. 59, p. 1-7, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.008>. Acesso em: 8 set. 2024.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010, 159 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SANTOS, R. D.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SILVA, M. G. da; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazonica** v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007.

SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R.; ALVES, I. C. N.; MAGALHÃES, M. A. Stability to thermal degradation and chemical composition of woody biomass subjected to the torrefaction process. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 6, p. 845-850, 2016.

SILVA, W. A. S. **Avaliação da influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal de Viçosa. 2017.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509–516, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159>.

SINDICADO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS, SINDIFER. **ANUÁRIO ESTATÍSTICO**. Ano base 2020. 52 p. 2021.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **ANUÁRIO ESTATÍSTICO 2023**. Belo Horizonte: SINDIFER, 2023. 27 p.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.r; 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.

TELEKEN, J. G.; BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; PARISOTTO, E. I. B.; OLIVEIRA, A. F.; Potencial dendroenergético de combustíveis sólidos de *Eucalyptus grandis*. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, n especial. p.523- 531, 2015.

TELEKEN, J. G.; OLIVEIRA, A. F.; PARISOTTO, E. I. B.; SILVA, L. F. F. Produção de carvão vegetal de uso siderúrgico a partir de resíduos da exploração florestal. 8. Ed. Editora científica, Guarujá-SP. 2022. Cap. 11, p. 154-172

VILELA, A.; LORA, E. S.; QUINTERO, Q. R.; VICINTIN, R. A.; SOUZA, T. P. da S. **A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration.** *Biomass and Bioenergy*, v. 69, p. 222-240, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.06.019>. Acesso em: 8 set. 2024.

Wang, K., Jiang, J., Liang, X., Wu, H., Xu, J., 2018. Direct conversion of cellulose to levulinic acid over multifunctional sulfonated humins in sulfolane-water solution. **ACS Sustainable Chem. Eng**, v. 6, p. 15092–15099, 2018.

WATAI, L. T. **Personal communication.** 1991.