

JULIANO SOUZA VASCONCELOS

**EFEITO DAS DIFERENTES TEMPERATURAS DE CARBONIZAÇÃO DE
MADEIRAS PARA A QUALIDADE DO CARVÃO**

Botucatu

2022

JULIANO SOUZA VASCONCELOS

**EFEITO DAS DIFERENTES TEMPERATURAS DE CARBONIZAÇÃO DE
MADEIRAS PARA A QUALIDADE DO CARVÃO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Martin
Biaggioni

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Marques
Barreiros

Botucatu

2022

V331e

Vasconcelos, Juliano Souza

Efeito das diferentes temperaturas de carbonização de madeiras para a qualidade do carvão / Juliano Souza

Vasconcelos. -- Botucatu, 2022

110 p. : fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: Marco Antônio Martin Biaggioni

Coorientador: Ricardo Marques Barreiros

1. Propriedades da Madeira. 2. Gradiente de densidade. 3.
Carvão. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EFEITO DAS DIFERENTES TEMPERATURAS DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRAS
PARA A QUALIDADE DO CARVÃO

AUTOR: JULIANO SOUZA VASCONCELOS

ORIENTADOR: MARCO ANTONIO MARTIN BIAGGIONI

COORIENTADOR: RICARDO MARQUES BARREIROS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA
NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RICARDO MARQUES BARREIROS (Participação Presencial)
Engenharia Industrial Madeireira / UNESP Campus de Itapeva



Prof. Dr. VLADIMIR ELIODORO COSTA (Participação Presencial)
Depto. de Biofísica e Farmacologia / IB/Botucatu - Unesp



Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE LIMA MELO (Participação Virtual)
Tecnologia e Recursos Naturais / Universidade do Estado do Pará



Prof. Dr. FERNANDO WALLASE CARVALHO ANDRADE (Participação Presencial)
Instituto de Biodiversidade e Florestas / Universidade Federal do Oeste do Pará



Prof. Dr. VICTOR ALMEIDA DE ARAUJO (Participação Virtual)
Grupo de pesquisa LIGNO / Universidade Estadual Paulista, Campus Experimental de Itapeva



Botucatu, 30 de maio de 2022

AGRADECIMENTOS

Ao Orientador Prof. Dr. Marco Antônio Martin Biaggioni e Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros. Aos Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bionergia (LABB) e do Laboratório de Secagem da Madeira, e do uso dos instrumentos e equipamentos do Departamento de Ciências Florestais, juntamente com o Departamento de Engenharia Rural e a Biblioteca, localizados na Faculdade de Ciências Agrárias FCA/UNESP Botucatu, em especial, aos técnicos Ricardo Rabelo de Arruda Filho, Edson Graciano Brito e Cláudio Roberto Ribeiro da Silva.

Agradeço ao Prof. Dr. André Luis Christoforo pela colaboração na estatística utilizado no trabalho. Ao Prof. Dr. Vladimir Eliodoro Costa e a Profa. Dra. Carmen Regina Marcati durante a Qualificação do Trabalho. Aos Prof. Dr. Julio Cezar Souza Vasconcelos e Prof. Dr. Victor Almeida de Araújo pelo arranjo científico da tese.

Quero agradecer também, a Polícia Ambiental 4 Cia 1° Pelotão em Ribeirão Preto/SP por arranjar amostras de espécies não comerciais e apreendidas durante os trabalhos de fiscalização contida no presente trabalho.

Agradecimentos à Banca de Defesa pelas contribuições da Tese, e aos demais envolvidos na construção e participação desta Pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento 001.

Em Memória do Orientador Elias Taylor Durgante Severo, Primeiro Orientador.

RESUMO

A madeira é um dos materiais que os humanos utilizam desde os tempos remotos em aplicações que incluem armas, diversos utensílios, habitações e fins energéticos. Possui estrutura elementar composta por carbono, oxigênio e hidrogênio, cujas propriedades oferecem inflamabilidade. A madeira é material higroscópico, constantemente em troca de umidade com meio para se estabilizar, e por não ser ortótropo essas trocas de umidade levam a variações de massa e dentro do PSF a variações dimensionais. O objetivo deste trabalho foi observar a carbonização em várias temperaturas de diferentes espécies de madeira e se possuem relações nas propriedades do carvão como aspectos físicos e químicos, identificando a degradação de forma visual. Dentre as espécies de madeira avaliadas, foram testadas as nativas folhosas *Dipteryx* sp., *Tabebuia* sp., *Peltogyne* sp., *Apuleia leiocarpa*, *Goupia glabra*, *Astronium lecointei*, *Hevea brasiliensis* e *Schizolobium parahyba*, *Qualea* sp. e *Aspidosperma* sp. e *Erismia uncinatum*, a nativa conífera *Araucaria angustifolia*, a exótica conífera *Pinus* sp. e a exótica folhosa *Eucalyptus* sp. Com relação aos ensaios realizados para a caracterização do carvão obtido a partir de cada uma dessas espécies, incluem-se os testes de densidade básica, estabilidade dimensional, perda de massa, análise imediata (teores de carbono fixo, de cinzas, de voláteis e de umidade), poder calorífico e degradação visual. A perda de massa e as mudanças dimensionais, em conjunto com a análise visual da presença de fissuras e rompimentos da madeira, pode representar importante característica para o estudo do carvão e o comprometimento da sua qualidade. O comportamento linear decrescente observado no gradiente da densidade básica não foi similar ao encontrado nas análises do poder calorífico, carbono fixo e perda de massa. A carbonização em altas temperaturas não tem correlação em propriedades como densidade e alteração das dimensões da madeira. O poder calorífico é uma propriedade importante na definição da qualidade, porém espécies mais densas em que há maior poder calorífico, demonstrou maiores danos em sua estrutura. Das espécies estudadas, aquelas de menor densidade básica, como: Guapuruvu, Araucária, Pinus e Cedrinho não tiveram avarias ou danos visíveis por meio da análise da degradação visual na temperatura de 300 °C. Para temperaturas acima desta (400 °C, 500 °C e 600 °C) ocorreram danos em todas as espécies. Ainda que as temperaturas tivessem quatro escalas, o

comportamento dessas propriedades se diferenciou entre as espécies para cada uma das carbonizações de 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C, de forma que a taxa de carbonização se mantivesse em média de 20 °C / min.

Palavras-chave: propriedades física e química; qualidade do carvão; madeira carbonizada; gradiente de densidade.

ABSTRACT

Wood is one of the materials that humans have used since ancient times in applications that include weapons, various utensils, housing, and energy purposes. It has an elemental structure composed of carbon, oxygen and hydrogen, whose properties offer flammability. Wood is a hygroscopic material, constantly exchanging moisture with a means to stabilize itself, and as it is not orthotropic, these moisture exchanges lead to mass variations and within the PSF to dimensional variations. The objective of this work was to observe the carbonization in different temperatures of different wood species and if there are relationships in the properties of charcoal as physical and chemical aspects, visually identifying the degradation. Among the species of wood evaluations, were tested as native hardwoods *Dipteryx* sp., *Tabebuia* sp., *Peltogyne* sp., *Apuleia leiocarpa*, *Goupia glabra*, *Astronium lecointei*, *Hevea brasiliensis*, *Schizolobium parahyba*, *Qualea* sp., *Aspidosperma* sp., *Erismia uncinatum*, the native coniferous *Araucaria angustifolia*, the exotic coniferous *Pinus* sp. and exotic softwood *Eucalyptus* sp. About the tests carried out for the characterization of the charcoal obtained from each of these species, include tests of basic density, dimensional stability, loss of mass, immediate analysis (contents of fixed carbon, ash, volatiles, and humidity), calorific value and visual degradation. Mass loss and dimensional changes, together with the visual analysis of the presence of cracks and collapses in the wood, may represent an important characteristic for the study of charcoal and the impairment of its quality. The decreasing linear behavior observed in the basic density gradient was not similar to that found in the calorific value, fixed carbon and mass loss analyses. Carbonization at high temperatures has no correlation with properties such as density and changes in wood dimensions. The calorific value is an important property in defining the quality, but denser species in which there is greater calorific value, showed greater damage to its structure. Of the studied species, those with lower basic density, such as: Guapuruvu, Araucaria, Pinus and Cedrinho, did not show damage or damage visible through the analysis of visual degradation at a temperature of 300 °C. For temperatures above this (400 °C, 500 °C and 600 °C) damage occurred in all species. Even though the temperatures had four scales, the behavior of these properties differed between the species for each of the carbonizations of 300 °C, 400 °C, 500 °C and 600 °C, so that the carbonization rate remained at an average of 20 °C / min.

Keywords: physical and chemical properties; coal quality; charred wood; density gradient.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camadas da carbonização e pirólise	23
Figura 2 - Eficiência da carbonização da madeira.....	32
Figura 3 - Esquema dos ensaios e procedimentos normativos da pesquisa.....	42
Figura 4 - Densidade básica por espécie	46
Figura 5 - Carbono Fixo nas quatro temperaturas de carbonização	54
Figura 6 - Perda de massa das espécies após a carbonização.	56
Figura 7 - Perda de massa em gramas nas quatro temperaturas de carbonização. .	59
Figura 8 - Densidade Aparente após carbonização.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Compilação dos trabalhos que observam as propriedades em estudos	20
Tabela 02 - Nomes comerciais e científicos e suas propriedades.....	40
Tabela 03 - Valores médios de análise imediata em 300 °C.....	48
Tabela 04 - Valores médios de análise imediata em 400 °C.....	49
Tabela 05 - Valores médios de análise imediata em 500 °C.....	51
Tabela 06 - Valores médios de análise imediata em 600 °C.....	52
Tabela 07 - Valores médios de Poder Caloríficos em Kcal/ nas temperaturas de carbonização	55
Tabela 08 - Diminuição das dimensões volumétricas em 300 °C.....	60
Tabela 09 - Diminuição das dimensões volumétricas em 400 °C.....	61
Tabela 10 - Diminuição das dimensões volumétricas em 500 °C.....	62
Tabela 11 - Diminuição das dimensões volumétricas em 600 °C.....	63
Tabela 12 - Imagens do plano anatômico transversal das espécies in natura.....	66
Tabela 13 - Imagens e condição do plano anatômico transversal das espécies carbonizadas em 300 °C.....	69
Tabela 14 - Imagens e condição do plano anatômico transversal das espécies carbonizadas em 400 °C.....	73
Tabela 15 - Imagens e condição do plano anatômico transversal das espécies carbonizadas em 500 °C.....	77
Tabela 16 - Imagens e condição do plano anatômico transversal das espécies carbonizadas em 600 °C.....	81
Tabela 17 - Coeficiente de variação (%) da perda de massa das espécies carbonizadas em diferentes temperaturas.....	87
Tabela 18 - Coeficiente de variação (%) da densidade básica aparente das espécies antes de serem carbonizadas nas diferentes temperaturas.....	88
Tabela 19 - Coeficiente de Variação (%) da densidade aparente das espécies após a carbonização nas diferentes temperaturas.....	88
Tabela 20 - Coeficiente de Variação (%) do Teor de Umidade das espécies para Análise Imediata nas diferentes temperaturas de carbonização.....	89
Tabela 21 - Coeficiente de Variação (%) do Teor de Materiais Voláteis na Análise Imediata das espécies nas diferentes temperaturas de carbonização....	89
Tabela 22 - Coeficiente de Variação (%) do Teor de Cinzas na Análise Imediata das espécies nas diferentes temperaturas de carbonização.....	90
Tabela 23 - Correlação em temperatura de 300 °C.....	91
Tabela 24 - Correlação em temperatura de 400 °C.....	92
Tabela 25 - Correlação em temperatura de 500 °C.....	94
Tabela 26 - Correlação em temperatura de 600 °C.....	95

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	JUSTIFICATIVA.....	18
1.2	OBJETIVO GERAL.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1	CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA.....	22
2.1.1	TEMPERATURA DE CARBONIZAÇÃO.....	24
2.1.2	TAXA DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA.....	25
2.2	DENSIDADE BÁSICA.....	27
2.3	PERDA DE MASSA.....	29
2.4	VARIAÇÃO DIMENSIONAL.....	30
2.5	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA.....	31
2.6	ANÁLISE IMEDIATA.....	33
2.7	PODER CALORÍFICO.....	35
2.8	DEGRADAÇÃO DO CARVÃO E ANÁLISE VISUAL	37
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	40
3.1	MATERIAL.....	40
3.1.1	PREPARO DOS MATERIAIS.....	41
3.2	METODOLOGIA.....	41
3.2.1	DENSIDADE BÁSICA.....	42
3.2.2	CARBONIZAÇÃO.....	43
3.2.3	CARBONO FIXO.....	43
3.2.4	PODER CALORÍFICO.....	43
3.2.5	DIFERENÇA DIMENSIONAL.....	44
3.2.6	PERDA DE MASSA.....	44
3.2.7	DEGRADAÇÃO VISUAL.....	44
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1	DENSIDADE BÁSICA.....	46
4.2	ANÁLISE IMEDIATA.....	47
4.2.1	CARBONO FIXO.....	53
4.3	PERDA DE MASSA.....	56

4.4	DIFERENÇA DE DIMENSÃO NA CARBONIZAÇÃO.....	59
4.4.1	DENSIDADE APARENTE.....	64
4.4.2	COMPARAÇÃO DA DEGRADAÇÃO SUPERFICIAL.....	65
4.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	87
4.5.1	COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DAS TEMPERATURAS.....	87
4.5.2	ESTATÍSTICAS: TEMPERATURA EM 300° - CORRELAÇÃO.....	91
4.5.3	ESTATÍSTICAS: TEMPERATURA EM 400° - CORRELAÇÃO.....	92
4.5.4	ESTATÍSTICAS: TEMPERATURA EM 500° - CORRELAÇÃO.....	94
4.5.5	ESTATÍSTICAS: TEMPERATURA EM 600° - CORRELAÇÃO.....	95
5	CONCLUSÕES.....	97
	REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

A madeira é um dos principais materiais utilizados em diversas aplicações na sociedade em benefício de vida humana. Por ser um material lignocelulósico possui em sua estrutura elementar grandes quantidades de carbono, oxigênio e hidrogênio, que formam compostos orgânicos dos quais é possível adquirir inflamabilidade.

O entendimento do comportamento da madeira em altas temperaturas para a aplicação em recursos energéticos é importante para que ocorra o uso correto e satisfatório em determinados produtos e finalidades, além das melhores espécies com sua otimização e melhoria na eficiência energética.

Quando a madeira de diferentes espécies passa por processos térmicos distintos, pode ocasionar resultados diferentes na carbonização, alterando a propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira.

Quando a madeira é carbonizada, as fibras sofrem modificação térmica e, como consequência, a degradação. Com isso, podem ocasionar mudanças na estabilidade dimensional como, por exemplo, trincas e rupturas oriundas da instabilidade dimensional intrínseca da madeira.

A madeira é um material anisotrópico e sua exposição à carbonização leva a redução de umidade e ao aumento de deformação pela perda de seu perfil estético e funcional. A perda de massa e a alteração da estabilidade dimensional são ocasionados em temperaturas elevadas de acordo com cada espécie, interferindo no volume geométrico da madeira carbonizada, até mesmo, na decomposição de seus constituintes.

O aumento da taxa de temperatura influencia a composição do carvão de forma negativa em alguns aspectos, à medida que diminui o tempo de carbonização até chegar na temperatura final durante a formação do carvão, sendo assim, a madeira carbonizada fica quebradiça, com menor resistência física e mecânica. Em seu estudo, Siebeneichler (2017) demonstrou que aumentos da taxa de temperatura reduziram a resistência da madeira do *Eucalyptus cloeziana*, quando carbonizado.

Diante da observação do comportamento da madeira frente à ação de carbonização, torna-se fundamental o estudo mais detalhado de suas características decorrentes a esse processo transformativo, sobretudo, em razão das possíveis alterações de suas propriedades físicas, químicas e visuais.

1.1 Justificativa

Diversas pesquisas são realizadas para caracterizar perda de massa, teor de carbono fixo e estabilidade dimensional e desta forma observar de forma quantitativa a qualidade do carvão. Contudo, para as áreas de carvoaria, siderúrgica e construção civil, existem poucos estudos e definições quanto à decomposição do material lignocelulósico por carbonização relacionadas a diferentes propriedades.

Alguns critérios são interessantes para a identificação de espécies utilizadas para determinados fins, antes de terem sido queimadas por motivos intencionais ou não, como por exemplo, produção de outros produtos ou incêndios respectivamente.

A cadeia produtiva e comercial do carvão ainda carece de informações técnicas e embasamento científico para a qualidade da madeira carbonizada. Por outro lado, no Estado de São Paulo existe a resolução nº 10 SAA de 14 de dezembro de 2015, que define como norma para que se tenha padrões de qualidade do carvão vegetal, na condição que o carbono fixo deve estar acima de 73%, cinzas abaixo de 1,5%, umidade abaixo de 5,0% e teor de material fino (< 12 mm) inferior ou igual a 5% do peso líquido (SÃO PAULO, 2015).

De acordo com Silva et al. (2019), quanto menor for a umidade no processo de carbonização, melhor é o carvão no sentido de ter menos teor de finos, ser quebradiço em seu manuseio e produção carvão.

No âmbito do material, Machado (2009) caracterizou as propriedades físico-químicas de três tipos de carvão de diferentes origens e determinou suas perdas de massa em relação ao tempo de queima, sendo menor no carvão vegetal em relação ao mineral.

Com isso, o conhecimento das características da degradação da madeira carbonizada pode ser tão importante quanto a da madeira *in natura* determinando o rendimento e a qualidade da madeira carbonizada, uma vez que a finalidade é entender o seu comportamento durante o processo de pirólise da madeira convertendo-se em carvão vegetal.

Conforme demonstra a Tabela 1, a literatura mais tradicional da carbonização da madeira se volta majoritariamente para o estudo das propriedades químicas e em menor escala para o estudo das propriedades físicas. Por sua vez, as propriedades visuais não representam uma medida de avaliação em uso nos principais estudos sobre a caracterização do carvão, em grande parte baseados em propriedades

quantitativas, apesar da possibilidade da obtenção de novos achados por meios qualitativos. Além disso, a instabilidade dimensional e sua relação com a perda de massa, importantes nessa caracterização, têm sido subvalorizados nos estudos científicos apesar dessas propriedades assegurarem o estado do material nesse processo degradativo da madeira. A partir desse contexto, surge a demanda de uma caracterização mais aprofundada na perspectiva das propriedades do carvão interrelacionadas com as características de várias espécies.

Tabela 1 - Compilação dos trabalhos que observam as propriedades em estudo.

Publicação	Quantidade de Espécies		Propriedades Físicas			Propriedades Químicas					Propriedade Visual
	Coníferas	Folhosas	Densidade da Madeira	Perda de Massa	Estabilidade Dimensional	Umidade	Cinzas	Materiais Voláteis	Carbono Fixo	Poder Calorífico	Degradação Superficial
Yatim and Hoi (1987)	1	5	X			X	X	X	X	X	
Antal Jr. et al. (1990)	0	1	X			X	X	X	X	X	
Vale et al. (2002)	0	47	X				X	X	X	X	
Neves et al. (2011)	0	1	X				X	X	X	X	
Carneiro et al. (2014)	0	2	X							X	
Soares et al. (2014)	0	1	X				X	X	X	X	
Couto et al. (2015)	0	2	X					X	X		
Castro et al. (2016)	0	4	X				X	X	X	X	
Pereira et al. (2016)	0	4	X				X	X	X	X	
Castro et al. (2016)	0	2	X				X	X	X	X	
Garcia et al. (2017)	0	1				X	X	X	X	X	
Narita et al. (2018)	0	1	X		X		X	X	X	X	
Silva et al. (2018)	0	5	X				X	X	X	X	
Ramos et al. (2019)	0	1	X				X	X	X		
Silva et al. (2019)	0	4	X			X	X	X	X	X	
Canal et al. (2020)	0	1	X			X	X	X	X	X	
Vasconcelos (2022) *	2	13	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Próprio autor. * Presente estudo.

Diante do apresentado na Tabela 1, verificou-se a demanda por uma pesquisa inédita a partir de um número representativo de espécies potencialmente energéticas existentes no Brasil e um maior repertório de ensaios de caracterização.

1.2 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi observar se a carbonização em várias temperaturas em diferentes espécies de madeira possui relação na qualidade do carvão com os aspectos físicos e químicos, identificando a degradação de forma visual anatômica.

Busca-se com isso, responder às seguintes questões:

- A maior degradação da madeira ocorre na exposição às temperaturas crescentes, conforme ocorre o gradiente de densidade aparente, ou seja, quando há mudanças significativas com diversas faixas de temperatura, a relação das espécies de menor densidade são consideradas de forma linear em comparação com as madeiras de maior densidade?
- O comportamento linear decrescente no gradiente da densidade básica é similar ao encontrado nas análises do poder calorífico, carbono fixo e perda de massa?
- Há influência da perda de massa e análise imediata na estabilidade dimensional com a carbonização da madeira?
- Existe relação entre as propriedades físicas, químicas e visuais conforme a temperatura é elevada?

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Carbonização da madeira

A carbonização é um processo de decomposição da madeira por ação de calor em altas temperaturas, pelas quais são volatilizados os líquidos e se produzem compostos gasosos, restando apenas um sólido composto quase exclusivamente de carbono puro. Este sólido é chamado de carvão vegetal.

A carbonização está numa escala térmica acima da, secagem, da torrefação e termorretificação, ou retificação térmica, sendo este (modificação térmica) um processo alternativo de agregação de valor à madeira, inibição de ataques xilófagos e melhoria na estabilidade dimensional. O tratamento térmico neste processo pode chegar em temperaturas próximas a 200 °C (MOURA; BRITO, 2011) até 260 °C.

Segundo ANEEL (2008), já o processo do carvão vegetal consiste no aquecimento do material original entre 300 e 500 °C, na “quase ausência” de ar, até a extração do material volátil. O principal produto é o carvão vegetal, juntamente com a pirólise, dando origem ao alcatrão e ao ácido pirolenhoso. No entanto, outras iniciativas empíricas foram muito além dessa faixa e condições atmosféricas, por exemplo, no projeto de Vesta, Wotton et al. (2012), que lideraram a experimentação da temperatura das chamas em incêndios florestais experimentais, alcançando 1100 °C nas observações de carbonização da madeira de eucalipto.

No âmbito do presente estudo, a carbonização da madeira foi considerada a partir de critérios de transformação de madeira em carvão conforme diferentes faixas de temperaturas. Um exemplo análogo se encontra no Quadro 1. Nessa pesquisa, Oliveira et al. (2013) propuseram que o sistema forno-fornalha pode ter quatro fases e os seguintes tempos de manutenção de acordo com a faixa de temperatura entre 100 °C até 470 °C.

Quadro 1 - Faixas teóricas de temperatura para controle da carbonização no sistema forno-fornalha, a serem mensuradas na cúpula do forno.

Fase	Temperatura [°C]	Tempo [Horas]	
I	100 - 150	15 – 16	Liberação de vapor de água – secagem da madeira, fase endotérmica.
II	150 - 275	11 – 12	Degradação das hemiceluloses, eliminação de gases, fase endotérmica.
III	275 - 400	23 – 24	Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica. Formação do carvão vegetal.
IV	400 - 470	17 – 18	Redução da emissão de gases, fase exotérmica. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal.

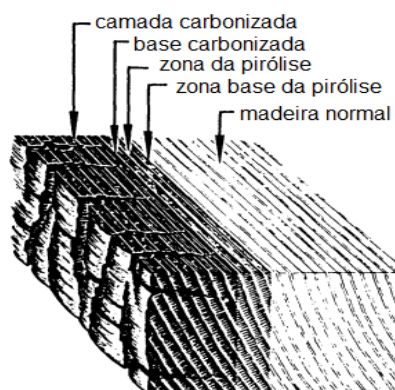
Fonte: Oliveira et al. (2013).

A madeira sofre decomposição química em camadas de carbonização a partir da superfície externa, cuja queima ocorre na zona de pirólise como mostra a Figura 1.

Durante a decomposição química da madeira, considerações importantes são apontadas segundo Raad (2015), dentre elas destacam-se:

- Para cada componente químico da madeira, os gases condensáveis e não condensáveis são diferentes.
- As características físicas da madeira influenciam no processo de queima.

Figura 1 - Camadas da carbonização e pirólise. Fonte: SCHAFFER, E. L.; *Charring Rate of Selected Woods-Transverse to Grain. Madison: Forest Products Laboratory, 1967.*



2.1.1 Temperatura de carbonização

Na obtenção do carvão vegetal, acontece o processo de pirólise nos três estados físicos que são: gasoso, sólido (carvão) e líquido (alcatrão e pirolenhoso). Para Severo (1998), é comum que a degradação pirolítica (térmica) seja menor que a hidrolítica. A madeira se transforma em carvão em temperaturas acima de 300 °C (temperatura final de carbonização 350 °C), nesse processo existe a concentração de carbono e liberação de matérias voláteis que variam por espécie (FUJIHARA et al., 2009).

O processo de carbonização ocorre em temperaturas superiores a 150 °C, com temperatura final máxima desejável de 500 °C, com o rendimento do processo variando em função da qualidade da madeira (densidade, umidade e teor de lignina) e da tecnologia de conversão empregada, ou seja, do tipo de forno (REZENDE, 2006).

A seguir, são elencados estudos que remetem sobre a influência da carbonização da madeira.

Segundo Oliveira et al. (2010), a espécie *Eucalyptus pellita* F. Muell. apresentou melhores resultados (maior rendimento gravimétrico e porcentagem de carbono na constituição do carvão, além de elevado poder calorífico superior e teor de carbono fixo), sendo todas essenciais como parâmetro para a qualidade do carvão vegetal, nas condições térmicas temperatura de 450 °C.

A demonstração de Vilas Boas et al. (2010) com resíduo de macaúba *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius e a influência da temperatura final no teor do carbono fixo, diminuindo a quantidade de materiais voláteis, alterando a qualidade do carvão em condições de 450 °C, 550 °C e 650 °C.

Gonçalves (2010) demonstrou que a carbonização até 400 °C não apresentou grandes alterações nas estruturas anatômicas do lenho carbonizado das espécies do cerrado: *Copaifera langsdorffii*, *Dalbergia violacea*, *Dimorph andramollis*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Caryocar brasiliense*, *Couepia grandiflora*, *Tapirira guianensis*, *Qualea grandiflora*, *Vochysia tucanorum* e *Pouteria torta*.

Os autores Azevedo et. al (2013) estudaram as temperaturas finais de 450 °C, 700 °C e 950 °C na madeira híbrida “urograndis” sendo que em 450 °C foi obtido maior rendimento gravimétrico e menores teores de cinzas encontrados, mostrando adequado para produção de carvão.

Figueiredo et al. (2018) em seus resultados discutem que as características físicas e químicas do carvão vegetal produzido a partir da madeira de *Pterogyne nitens* se alteraram com a interferência da temperatura final de carbonização e, desta forma, pode ser utilizado como critério de qualidade do carvão, sendo a temperatura final de 450 °C ótima para carbonização da madeira da referida espécie. Há uma relação direta entre a temperatura final de carbonização e teor de carbono fixo, teor de minerais, tensão máxima suportada e resistência à penetração da semiesfera no carvão vegetal. Há uma relação inversa entre a temperatura de carbonização e o teor de compostos voláteis. Observou que a carbonização a 450 °C e 550 °C causa mais rigidez em comparação à temperatura de 350 °C.

Bezerra et al. (2014) obtiveram médias de carbonização da *Mimosa tenuiflora* (Mart.) Benth (Jurema Preta) em diferentes marchas (rampas) de temperatura: tendo a 1ª Marcha (400 °C) rendimento de 48,38%, a 2ª Marcha (550 °C) rendimento de 41,70% e a 3ª Marcha (650 °C) rendimento de 38,11%. Com esse resultado, pode-se observar também que quanto menor foi a temperatura final de carbonização, maior foi o rendimento em carvão, provavelmente devido à menor exposição de calor (400 °C), a qual a madeira foi submetida, sofrendo uma menor degradação durante o processo de carbonização.

Em madeira do cerne e alburno de *Hymeneae courbaril* L. submetida às temperaturas finais de 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C em taxa de aquecimento de 1,3 °C por minuto em uma retorta elétrica com controle de temperatura, pôde-se verificar que, para o alburno, ocorreu uma redução volumétrica de 50% em torno de 450 °C, enquanto para o cerne esta redução aconteceu acima de 600 °C. O cerne demonstra, dessa forma, possuir uma maior resistência à degradação térmica que o alburno (DA SILVA; TRUGILHO, 2003).

A temperatura final é uma variável importante para determinação da qualidade do carvão (TRUGILHO; SILVA, 2001).

2.1.2 Taxa de carbonização da madeira

Dentre os principais parâmetros utilizados no processo de carbonização, a taxa de aquecimento, ou seja, a velocidade em que a temperatura se eleva dado um intervalo de tempo apresenta-se como uma das mais importantes variáveis no

rendimento gravimétrico dos produtos obtidos. De forma geral, taxas de aquecimento mais elevadas tendem a diminuir a quantidade de carbono fixo no carvão vegetal, de forma a obter um produto mais friável, o que reduz significativamente sua qualidade e seu valor agregado (SANTOS, 2010).

O trabalho de Braga Júnior et al. (2019) consistiu em análise de três indivíduos a partir de corpos de prova de *Alexa grandiflora* Ducke com dimensão de 1,5 cm x 1,5 cm x 3 cm dos quais obteve-se lâminas histológicas de carvão. Para a produção do carvão, os corpos de provas foram submetidos a um processo de carbonização em uma taxa de aquecimento de 1,66 °C/min, mantidas a 450 °C. Desta forma, a parede celular da madeira continuou preservada.

Azevedo et al. (2013) observaram no eucalipto *urograndis* em temperatura final de 450 °C um maior rendimento gravimétrico do carvão. Porém, em relação à influência da taxa de aquecimento sob o rendimento do carvão vegetal nota-se que não houve diferença significativa das análises, dessa maneira, pressupõe-se que existe uma pequena diferença entre as taxas de aquecimento adquiridas na mufla. Provavelmente isto pode ter ocorrido pelo simples fato de que às taxas de aquecimento utilizadas (12,3 °C/min; 12,7 °C/min e 13,1 °C/min) terem apresentado uma grande proximidade entre si, variando apenas 0,4 °C/min.

O experimento de Medeiros (2018) para o eucalipto (*E. urophylla* e *E. grandis*) e jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) teve taxas médias de aquecimento de 0,7 °C/min, 1,0 °C/min e 1,4 °C/min. Os produtos obtidos com a carbonização do eucalipto entre 100 °C e 450 °C, com os rendimentos em carvão vegetal variando na faixa de 29% a 36%, demonstrou uma tendência na taxa de aquecimento no processo de carbonização inversamente proporcional ao rendimento de carvão vegetal.

Pulido-Novicio et al. (2001) aplicaram três taxas de aquecimento (4 °C/min, 20 °C/min, e 50 °C/min) na madeira Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don). Os autores observaram que à medida que foi aumentando a taxa, ocorria o encolhimento das células do lenho.

Silva et al. (2018) estudou a relação da temperatura e sua taxa para cinco espécies tropicais de *Cordia geoldiana*, *Hymenolobium petraeum*, *Hymenaea courbaril*, *Tabebuia* sp. e *Astronium lecointei*. A metodologia utilizou 20 corpos de provas com dimensões de 2,0 cm x 2,0 cm x 5,0 cm, repetindo o procedimento de queima dos corpos de provas por 10 vezes. A taxa de aquecimento foi de 1,25 °C/min

para 450 °C e 1,19 °C/min para 500 °C, concluindo que a melhor temperatura foi de 500 °C possuindo menor taxa de carbonização.

Da literatura encontrada, a faixa de 450 °C é sugerida como a temperatura próxima do ideal para um carvão de melhor qualidade combinadas com controles adequados das taxas de aquecimentos. Taxas acima de 50 °C/min de temperatura implica em maior decomposição e degradação do carvão, contribuindo para danos e ruptura da madeira carbonizada.

2.2 Densidade básica

A densidade básica é uma das principais propriedades da madeira. Concomitantemente, há a complexidade dos fatores que envolve a densidade da madeira, podem ser o formato anatômico das fibras, arranjos e até mesmo o tipo da madeira, sendo lenho juvenil ou não (FOELKEL et al., 1971).

A densidade básica da madeira pode ser utilizada como parâmetro de escolha para um carvão de maior rendimento e potencial energético, já que maiores densidades desse material possuem menores porosidades e maiores quantidades de material lenhoso. Isso foi o que Andrade e Carvalho (1998) observaram com relação ao *Eucalyptus* spp. (eucalipto) de densidade básica do carvão de 0,50 g/cm³ e *Schizolobium parahyba* (guapuruvu) de densidade básica 0,24 g/cm³, descrevendo que o guapuruvu não é indicado para produção de carvão. Paula et al. (2000) destacam que espécies com baixas densidades possuem paredes finas, e menores quantidade de celulose e lignina.

Oliveira et al. (2010) estudaram *Eucalyptus pellita*, observando que a densidade básica do carvão aumentou com o aumento da temperatura, variando entre 1,46 g/cm³ e 1,67 g/cm³. Isso se deve provavelmente à queda no teor de voláteis e aumento no teor de carbono.

Brito et al. (1984) obtiveram a densidade básica média do *Pinus caribaea* var. *hondurensis* 0,353 g/cm³, *Pinus caribaea* var. *baham.* 0,335 g/cm³, *P. oocarpa* 0,396 g/cm³. Os autores chegaram na conclusão de que as três espécies testadas apresentaram rendimentos de carbonização menores comparadas as espécies tradicionais de eucalipto, tendo o melhor rendimento o *P. caribaea* var. *hondurensis*.

O estudo de Machado et al. (2014) mostrou que na espécie *Melia azedarach* L., o carvão produzido a 300 °C foi mais denso (0,34 g/cm³) que o produzido a 400 °C (0,30 g/cm³) e teve maior rendimento gravimétrico, no valor de 35,21% (300 °C) e 26,46% (400 °C). Vidaurre et al. (2012) mostraram que o teor médio de carbono fixo foi de 17,68%, o teor médio de materiais voláteis foi de 24,5% e o teor médio de cinza foi de 1,3% na madeira *Schizolobium amazonicum*.

Madeiras que possuem em suas paredes uma alta fração de fibras, conseqüentemente maior densidade de material, devem ser recomendadas para a geração de energia, seja pela queima direta ou pela produção de carvão vegetal (PEREIRA et al., 2016).

Para Pereira (2013), em situações de queima, a madeira tem comportamento que pode variar de acordo com a sua dimensão e a umidade presente no lenho. Outro aspecto importante é que madeiras mais leves e macias inflamam facilmente, já as madeiras duras e densas carbonizam menos quando comparadas às menos densas.

2.2.1 Densidade aparente

Para Andrade et al. (2018) a densidade básica da madeira pode influenciar significativamente o encolhimento volumétrico da madeira, o teor de cinzas e a densidade aparente do carvão vegetal. Desta forma, a densidade básica da madeira pode causar em torno de 73% a variação da densidade aparente do carvão vegetal, formando uma razão proporcional entre essas variáveis. Sendo aconselhável selecionar madeira com alta densidade básica para o carvão.

Na densidade aparente diferente da densidade real, os espaços vazios também são considerados no material estudado (SAMPAIO e SILVA, 2007).

É possível determinar diversos tipos de densidade na madeira. As mais usualmente aceitas são a densidade básica, a densidade anidra e a densidade aparente. A densidade aparente pode ser encontrada pela relação da massa e do volume, quando o teor de umidade é conhecido, conforme sugerem TRUGILHO et al. (2002).

No carvão podem ser adotadas técnicas que alterem a densidade aparente. Fatores relacionados com o processo de carbonização podem afetar a densidade do carvão produzido, como a temperatura final de carbonização e a taxa de aquecimento,

além da matéria-prima. Foi o caso do estudo de Dias Junior et al. (2016) que encontrou valores para o *E. grandis* ($0,34 \pm 0,04 \text{ g cm}^{-3}$) e para *E. saligna* ($0,32 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$).

Enquanto Dos Santos et al. (2011) encontraram valores entre $0,266 \text{ g/cm}^3$ e $0,345 \text{ g/cm}^3$ para a densidade aparente do carvão dos clones *E. urophylla* x *E. grandis* e *E. camaldulensis* x *E. grandis*, como afirmam ARANTES et al. (2013).

O estudo De Loureiro et al. (2021), com clones híbridos no cruzamento *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* tiveram maiores densidade aparente e energética em comparação *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora*.

No trabalho de Dias Júnior et al. (2016), foram observadas relações decrescentes significativas entre o teor de cinzas do carvão e a densidade aparente em espécies *E. grandis* e *Eucalyptus saligna*.

A densidade aparente tem a tendencia de aumentar no sentido da medula para a casca, independente das classes diamétricas. Da mesma forma no estudo houve ocorrência de maior valor da densidade na posição radial externa e menor na posição radial central, foi o caso do carvão do clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.

Figueiredo et al. (2018) estudaram a *Pterogyne nitens* Tul. constatando que a menor densidade aparente foi atingida na temperatura de 300°C e tendo aumento de acordo com que a temperatura final de carbonização fosse crescente.

Oliveira et al. (2018), observaram que a densidade da *hevea brasiliensis* variou de $0,607 \text{ g/cm}^3$ até $0,784 \text{ g/cm}^3$, dependendo se era lenho juvenil e lenho adulto e se a região teve extração de látex.

Segundo Vale, Dias e Santana (2010), quanto mais alta a densidade aparente do carvão afeta positivamente a resistência mecânica, biocombustível e maior produtividade energética ocasionando também menores custos durante o transporte.

2.3 Perda de massa

Perda de massa é o processo no qual o volume lenhoso combinado com a densidade é reduzido a partir da interferência térmica em sua composição química e física. Nesse caso, a ação do calor surge como um dos principais modos transformativos da composição física da mudança da madeira para o carvão.

As amostras da madeira paricá (*Schizolobium amazonicum*) foram carbonizadas em mufla (150 °C por 60 min, 200 °C por 60 min, 250 °C por 90 min, 350 °C por 90 min e 450 °C por 60 min). O percentual de perda de massa foi maior (50,39%), na faixa compreendida entre 300 e 400 °C, comparada com as demais temperaturas, faixa que ocorre maior degradação dos componentes químicos (VIDAURRE et al., 2012).

No estudo de Perdigão et al. (2020) as espécies *Swietenia macrophylla* e *Hevea brasiliensis* *Bertholletia excelsa* e *Eucalyptus* spp. apresentaram em média percentual da perda de massa em 31%.

O experimento, feito por Secchi et al. (2017), caracterizou carvões vegetais de espécies nativas do Rio Grande do Sul. Com as análises, foi possível perceber uma redução em média, 75,57% de massa das amostras após a carbonização em relação às amostras *in natura*.

No estudo de Oliveira et al. (2014), a celulose teve perda de massa em função da temperatura variando em 357 °C e 373 °C; já a lignina, a perda ocorreu entre 300 °C e 500 °C. Entre 200 °C e 310 °C ocorreu a degradação das hemiceluloses.

2.4 Variação dimensional

A transformação da madeira em carvão por processo térmico influencia tanto as suas propriedades físicas como químicas, sendo responsável também pela deformação de suas dimensões.

A umidade interfere diretamente na contração em processos de secagem e expansão na saturação da umidade. Em situações de elevadas temperaturas combinado com alto teor de umidade da madeira e extrativos, pode ocorrer o colapso, que é um defeito gerado por rompimento das células e das paredes celulares (MARQUES; MARTINS, 2002).

Moutinho (2013) notou nas espécies dos clones *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. e os híbridos *E. urophylla* x *E. grandis*, e *C. torelliana* x *C. citriodora* alterações e perda dimensional linear e volumétrica nas condições de 400 °C.

Desta maneira, as propriedades físicas, juntamente com a extração da umidade e o tempo de exposição ao calor, degradam o volume geométrico da madeira carbonizada. Em outro sentido, França (2019) observou em estudo que em

temperaturas abaixo de 260 °C não provocou a danificação na superfície da madeira de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* spp. em determinado tempo.

A excessiva alteração dimensional decorrente do aumento da temperatura pode provocar danos na madeira carbonizada. Foi o que Thery-Parisot et al. (2016) observaram que o aumento da temperatura provoca um aumento no número médio de fendas de retração com um efeito maior em amostras de madeira verde (em média 12 FR/cm² a 300 °C, 30 FR/cm² a 500 °C e 40 FR/cm² a 650 °C). Desta forma, todas as amostras apresentaram fendas de retração visíveis, independentemente do teor de umidade inicial da madeira. As variáveis temperatura e umidade tiveram um efeito significativo sobre o número de fendas de retração por amostra. O aumento da temperatura provoca um aumento no número médio de fendas de retração com um efeito maior nas amostras de madeira verde, tanto na exposição em fogueiras em espaços abertos quanto em ensaios controlados no forno mufla.

Os mesmos autores observaram de forma macroscópica, grandes fendas radiais, transversais e oblíquas que se estendem ao longo do eixo longitudinal, às vezes quase dividindo a amostra em duas partes nesta orientação. A contração não ocorre em proporções iguais no lenho, sendo a tendência ocorrer maior contração no plano tangencial, paralelamente às fibras e aos vasos, e menor nos planos radial e longitudinal.

2.5 Composição química da madeira

A composição química elementar do lenho possui principalmente carbono e oxigênio, prevalecendo o percentual de 49% a 50% e 44% a 45%, respectivamente. Na sequência, a percentagem do hidrogênio é de 6% e de nitrogênio varia de 0,1% a 1%. Em menores concentrações, ainda são também encontrados minerais como cálcio, potássio, magnésio, entre outros (KLOCK, 2005).

Os elementos químicos como carbono, oxigênio e hidrogênio combinados formam as macromoléculas. As principais que constituem a madeira são: celulose, hemiceluloses, lignina. Enquanto, que os extrativos possuem baixo peso molecular.

De acordo com Winandy e Rowell (2005) a celulose pode variar entre 40% e 45%, as hemiceluloses próximas de 20%, a lignina entre 15% e 35%, e outros constituintes como os extrativos em até 10%.

Conforme Fengel e Wegener (1989), os teores médios nas coníferas para a celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos são: $42 \pm 2\%$, $27 \pm 2\%$, $28 \pm 2\%$ e $5 \pm 3\%$, respectivamente. Nas folhosas, o teor de celulose é $30 \pm 5\%$, de hemiceluloses é $45 \pm 2\%$, de lignina é $20 \pm 4\%$ e de extrativos é $3 \pm 2\%$.

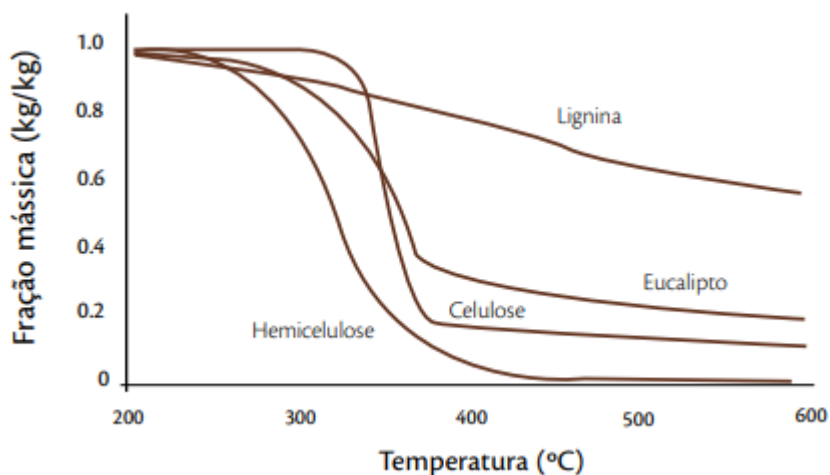
Mattos et al (2006) identificou que a composição química da *Araucária Angustifolia* (Bert.) O. Kuntze como o teor de extrativos foi de 3,8%, o teor de lignina 27,8% e o teor de holocelulose 68,4%.

Os extrativos podem provocar estabilidade térmica ocasionando melhoras no rendimento do carvão (SANTOS et al., 2011).

Pereira et al. (2013) observaram que a partir da temperatura de 275 °C em clones de eucalipto, ocorreu o início de liberação de calor, o que evidencia a decomposição química da madeira Durante o experimento com 6 clones de eucalipto, atingiu picos exotérmicos até a temperatura próxima de 381 °C.

A Figura 2 mostra a eficiência da carbonização da madeira de acordo com o estudo de Raad et al. (2006), em que a partir de 250 °C ocorre perda da fração mássica na lignina, hemicelulose. A perda de massa da celulose inicia acima de 300 °C de forma exponencial e após 400 °C atinge 80% de degradação. A hemicelulose também perde massa de forma exponencial e na temperatura acima de 400 °C está totalmente degradada. Por sua vez, a lignina tem perda com ocorrência de maneira linear, chegando a 40% na temperatura de 600 °C.

Figura 2 - Eficiência da carbonização da madeira. Fonte: Raad et al. 2006.



Pereira et al. (2012) observaram clones dos eucaliptos (*E. camaldulensis*, *E. urophylla* e os híbridos *E. urophylla* x *E. grandis* e observaram que existe uma relação entre o teor fixo de carbono do carvão vegetal e o teor de lignina, sobretudo, devido as propriedades de estabilidade térmica e o alto teor de carbono em sua composição, que por sua vez, contribui para o aumento do carbono fixo do carvão vegetal.

2.6 Análise imediata

Análise imediata é um conjunto de ensaios químicos do carvão que consiste em teores de umidade, cinzas e materiais voláteis que, quando calculados, encontra-se o carbono fixo. Damásio et al. (2013) discutem que teores de cinzas menores que 1% é adequado para o uso siderúrgicos. Já o carbono fixo, a faixa satisfatória é entre 75% e 80%.

A pesquisa de Vale et al. (2002) sobre a análise imediata como o carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV) e cinzas (CZ) de diversas espécies do cerrado é mostrada no Quadro 2. É possível observar também a densidade básica (Db) dessas espécies. O gênero *Qualea* possui maior carbono fixo e o menor teor de materiais voláteis. O gênero *Aspidosperma* teve os menores teores de cinza, enquanto, duas espécies tiveram o maior teor de cinzas, pertencente ao gênero *Vochysia* que foram as *Vochysia elliptica* e *Vochysia rufa*. Comparando espécies do mesmo gênero é possível observar que a *Tabebuia* e *Aspidosperma*, de maior densidade, possuem maior carbono fixo.

Quadro 2 - Espécies do cerrado e suas propriedades.

Espécies	Db (g/cm³)	MV (%)	CZ (%)	CF (%)
<i>Aspidosperma macrocarpon</i>	0,61	78,96	0,27	20,77
<i>Aspidosperma tomentosum</i>	0,58	80,32	0,35	19,33
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>	0,78	77,37	1,08	21,55
<i>Qualea grandiflora</i>	0,69	76,37	0,36	23,27
<i>Qualea multiflora</i>	0,66	75,63	0,56	23,81
<i>Qualea parviflora</i>	0,69	77,07	0,81	22,12
<i>Tabebuia ochracea</i>	0,62	81,20	0,42	18,38
<i>Tabebuia serratifolia</i>	0,69	78,50	0,84	20,66
<i>Vochysia elliptica</i>	0,57	80,69	1,38	17,93
<i>Vochysia rufa</i>	0,40	79,12	1,44	19,44
<i>Vochysiathyrsoides Pohl.</i>	0,49	80,03	0,81	19,16

Fonte: Sumarizado de Vale et al. (2002).

De acordo com Silva et al. (2017), o carbono fixo é o componente químico que predomina quando a madeira é carbonizada. O teor de carbono fixo é calculado pela soma percentual da umidade, dos teores de materiais voláteis e de cinzas, subtraída da totalidade de 100% (CASTRO et al., 2013). Sendo assim, para chegar nos valores do carbono fixo, é necessário proceder antes, o ensaio da análise imediata que consiste dos ensaios de teor de umidade que é eliminada no aquecimento, teor de matéria volátil sendo hidrocarbonetos e outros gases não condensáveis eliminados na destilação (FAO, 1985) e o teor de cinzas que são resíduos mineral após carbonização completa, formado por óxidos e silicatos (VITAL et al., 1986).

O gênero *Pinus* como *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* o carbono fixo teve médias em 74,70 %, materiais voláteis em 24,90 % e cinzas em 0,30%. *Pinus Caribaea* var. *Bahamensis* o carbono fixo ficou com 74,80%, materiais voláteis com 24,90% e teor de cinzas com 0,40%. *Pinus oocarpa* a média do carbono fixo esteve em 74,40%, materiais voláteis em 25,30% e cinzas em 0,30% (Oliveira et al., 2017).

No estudo de Machado et al. (2014), a espécie de Cinamomo (*Melia azedarach* L.) mostrou que o carvão produzido a 300 °C apresenta propriedades bem diferentes do produzido a 400 °C, observando-se um aumento no teor de carbono fixo de 67,60% a 75,35% para o carvão produzido a 300 °C e 400 °C, respectivamente. Por sua vez,

Leles et al. (2014) pesquisou a mesma espécie na temperatura de 700 °C e obteve rendimento do carbono fixo nos valores médios entre 21,23% e 21,38%.

O estudo de Damásio et al. (2015) mostrou que o controle da carbonização pela temperatura interna proporciona aumento no rendimento em carvão vegetal em fornos circulares, obtendo poder calorífico elevado quando o teor de carbono fixo de 83,14% nas temperaturas entre 450 °C e 480 °C para a espécie de *Eucalyptus* spp.

Assis et al. (2008) estudaram o teor de carbono fixo do *Eucalyptus* spp. a 450 °C chegando no percentual médio de 71,77%. Andrade (1998), por sua vez, observou as espécies Guapuruvu (*Schizolobium parahyba*) e Eucalipto (*Eucalyptus* spp.) com diferenças de rendimento médio de carbono fixo (RCF) de, respectivamente, 24,61% e 28,69% na temperatura de 250 °C e diferentes temperaturas (RCF) de 23,24% e 26,16% a 400 °C.

Em temperatura de 400 °C a análise imediata da cupíuba (*Goupia glabra*) tendo 28,23% de materiais voláteis, 1,10% de cinzas e 70,67% carbono fixo (NAMAZAWA, 1990).

No trabalho de Martins (2013) foi realizada análise imediata para o ipê roxo (*Tabebuia avellanedae*), tendo a composição para o teor de cinzas no valor médio de 3,88%, materiais voláteis de 22,91% e carbono fixo de 73,41%.

A faixa térmica para transformação da madeira em carvão vegetal no trabalho de Assis et al. (2008) teve como temperatura inicial em 200 °C e a final em 450 °C para a madeira de *Eucalyptus* spp., com intuito de propor um sistema alternativo para carbonização, sendo um forno adaptado construído como protótipo, contendo unidade de fabricação de carvão, unidade isolante e câmara de combustão externa. Os valores médios do carbono fixo, foi de 71,77%, considerado um valor alto e adequado.

O alto teor de cinzas afeta negativamente a produção de carvão, siderúrgica (Santos, 2008; Figueiredo et al., 2008). O poder calorífico pode ser influenciado pelo teor de cinza, pois quanto menor for este teor o poder calorífico será maior.

2.7 Poder calorífico

O poder calorífico é a quantidade de calor liberada na combustão completa de uma unidade de massa de carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 2015).

Neste contexto existe o Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder Calorífico Inferior (PCI).

De acordo com Brasil (2008):

“Poder calorífico é a quantidade de energia liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume de gás a pressão e temperatura constantes, 101,33 kPa (1.013,25 mbar ou 760 mmHg) e 15°C, respectivamente. Essa grandeza é expressa em unidades de energia por unidade de massa de gás, MJ/kg, ou por unidade de volume de gás, MJ/m³”.

As madeiras densas são consideradas moderadamente inflamáveis. Seu poder calorífico é em torno de 4800 kcal/kg para densidades maiores que 0,750 g/cm³ (Pereira, 2013).

A norma ASTM E 119-00a (2000) estabelece, com base em testes de queima em componentes estruturais, que a relação entre a massa de materiais combustíveis e a duração do fogo, incorporando materiais com poder calorífico ou potencial com valores de calor equivalentes à madeira e ao papel, varia entre 16,3 MJ/kg a 18,6 MJ/kg.

O poder calorífico possui relação inversa com o material inorgânico que após a carbonização são convertidas em cinzas. Os materiais voláteis como o próprio nome, decompõe rapidamente durante a queima, como consequência diminui a capacidade de combustível, resultando em menor eficiência energética. Ao contrário acontece com o carbono fixo, pelo motivo da relação direta com o poder calorífico, aumentando tempo de residência dentro do equipamento de carbonização (CHAVES et al., 2013).

Pereira et al. (2020), relacionaram o poder calorífico líquido e a densidade básica. O estudo mostrou que a espécie *Peltogyne* sp. teve o teor de cinzas 0,60% e o poder calorífico superior 4.623 kcal/kg.

No trabalho de Da Silva et al. (2018), poder calorífico para o ipê (*Tabebuia* spp.) foi 7.468,55 Kcal/kg em 450 °C e 7.502,40 Kcal/kg em 500 °C, para a muiracatiara (*Astronium lecointe*) foi 7.178,96 Kcal/kg em 450°C e 7.062,43 Kcal/kg em 500 °C.

Oliveira et al. (2017) chegaram no percentual médio do poder calorífico para o *Pinus caribaea* var. *Hondurensis* em 7.447 Kcal/Kg, *Pinus Caribaea* var. *Bahamensis* em 7.447 Kcal/Kg e *Pinus oocarpa* em 7.477 Kcal/Kg.

No trabalho de Schoninger e Zinelli (2012) a média do *Apuleia leiocarpa* com a umidade da madeira 8% e umidade 6,17% do carvão, enquanto a análise imediata como materiais voláteis sendo 23,45%, teor de cinzas 15,31 e carbono fixo 61,13%.

O tauari (*Couratari guianensis* Aubl) possui o poder calorífico em 4446,14 cal/g com umidade de 10% teor de cinzas 0.51%. A *Qualea paraensis* Ducke (mandioqueira) *Vochysiaceae* com a umidade de 9,1% e teor de cinzas 1,09% e poder calorífico 4484,88cal/g (ANDRADE et al., 2013).

Coelho e Neto (2008) pesquisaram as espécies de madeiras para fins industriais no Mato Grosso por meio de relatórios do Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SEMA) e Cunha et al. (1989) em que o poder calorífico da *Erismia Ucinatum* tinha 4.523 kcal/kg e densidade básica de 0,55 g/cm³.

2.8 Degradação do carvão e análise visual

A umidade pode ser um fator explicativo para os danos causados na região superficial do carvão. Com a umidade alta, ocasiona a diminuição do rendimento do carvão, energia e carbono fixo. Também há produção de vapor d'água, o que compromete as células do parênquima, rompendo a madeira carbonizada (Canal et al., 2020).

Várias pesquisas como a de Nisgoski (2014), Gonçalves et al. (2016) e Couto (2014), que envolveram propriedades anatômicos e visuais da madeira são amplamente utilizadas tanto no aspecto estético, como para fins de caracterização da espécie e, até mesmo, entender o comportamento mecânico. Nessa perspectiva, as trincas e rachaduras compõem os danos visuais ocasionados pela degradação da madeira carbonizada.

Porém, a aplicação das propriedades visuais na qualidade do carvão ainda é pouco abordada, com a finalidade de caracterização de danos. Com sua característica anisotrópica na madeira, existem alterações importantes observáveis nas características físico-mecânica da madeira. Desta forma, o estudo em cada plano de corte, devido a sua heterogeneidade no sentido da disposição celular, ocorre em várias posições de corte como: transversal, longitudinal radial e longitudinal tangencial (BURGUER; RICHTER, 1991).

Os planos de corte demonstram que há diferenças no comportamento das fibras carbonizadas e há alterações significativas das células, quando carbonizadas. Em temperaturas elevadas, bem como o processo de tratamento térmico, afetam o arranjo microscópico da madeira quando transformado em carvão.

Na conversão da madeira em carvão, a estrutura anatômica continua conservada, contudo, podem ocorrer variações morfométricas durante a carbonização, o que dificulta a distinção visual entre espécies. Essas alterações anatômicas devem ser estudadas por meio da análise estrutural das amostras do lenho antes e depois de carbonizadas (PRIOR; GASSON, 1993).

Andrade et al. (2019) procederam na etapa de carbonização, que mantivesse a temperatura inicial a 150 °C com um incremento de 0,83 °C/min até atingir uma temperatura final de 450 °C, durante 7 h de carbonização. Assim, ocorreu a distorção das propriedades visuais e anatômicos da madeira.

Diversas técnicas têm sido utilizadas para descrever o carvão em seu aspecto anatômico e visual. Como exemplo: estudos antracológicos fornecem, a partir das mesmas amostras, informações importantes tanto no domínio das variações paleoambientais e paleoclimáticas quanto em aspectos paleoetnológicos (YBERT-SCHEEL, 2004). Vários trabalhos envolvendo caracterização qualitativa da anatomia com técnicas visuais sobre anatomia da madeira e carvão descrevem como a temperatura de 450 °C é amplamente utilizado para identificar o carvão.

Um desses estudos é o que, até 450 °C, aspectos anatômicos da madeira se mantiveram identificável, mesmo estando carbonizado, como foi o caso da araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) Kuntze), da mandioqueira (*Qualea* cf. *acuminata* Spruce ex Warn.) e do pinus (*Pinus taeda*) (MUÑIZ et al., 2012).

Desta forma, Pereira (2013) utilizou as posições tangencial, radial e transversal, sendo esta última mais útil para identificar as espécies em nível macroscópico, com lupa de aumento de 10 vezes. Por sua vez, Souza et al. (2015), a partir da lupa com o aumento de 10 vezes e estéreo microscopia de luz refletida com aumentos de 10 a 25 vezes, observaram a espécie roxinho (Fabaceae Lindl. *Peltogyne* cf. *maranhensis* Huber ex Ducke) e mostraram que, na temperatura de 450 °C, os anéis de crescimento mantiveram-se preservados.

Gonçalves et al. (2016) analisaram visualmente madeiras de 25 espécies do cerrado, carbonizando-as em temperatura máxima de 450 °C. Os autores utilizaram imagens da madeira nos planos transversais, devido à maior quantidade de

informações anatômicas, como a textura, o brilho, a vitrificação. Nesta temperatura foram encontradas rupturas e alguns caracteres especiais quando degradadas em alta temperatura, porém esses danos não comprometeram a identificação anatômica da madeira.

Nisgoski et al. (2012) também caracterizam o lenho carbonizado de *Copaifera* cf. *langsdorfii* Desf. e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Wild. A temperatura final utilizada não alterou a estrutura anatômica de ambas as espécies, o que permitiu sua diferenciação até a temperatura de 450 °C, com pequenas fissuras no carvão estudado. Em outro estudo, Nisgoski et al. (2014) observaram as variações dimensionais e a degradação da madeira *Schefflera morototoni*. Para o ensaio, foram coletadas oito amostras de cada espécie, com dimensões de 2 cm x 2 cm x 5 cm, orientadas nas três posições anatômicas (tangencial, radial e longitudinal), carbonizadas em mufla e deixadas por duas horas na temperatura de 450 °C, concluindo que após a queima, o material estudado continuou identificável e, desta forma, houve pouca degradação visual.

As características descritivas dos clones de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. urophylla* e *E. grandis* foram, em sua maioria, mantidas após a carbonização entre 100 °C e 450 °C com incremento de 50 °C, conforme mostraram Pereira et al. (2016).

A partir do processo de carbonização, as espécies apresentaram danos em determinadas temperaturas. Portanto, a exposição em altas temperaturas evidenciou a presença de danos em diversas amostras estudadas. A densidade não apresentou influência na observação referente aos danos (Vasconcelos et al., 2021).

Diante da consideração comum à temperatura de 450 °C nos diversos estudos supracitados, o presente estudo prioriza valores próximos a essa faixa, por representar a máxima condição de nível de calor sem a degradação expressiva das amostras carbonizadas. Então, a metodologia adotada para a dimensão dos corpos de prova e temperatura de queima na identificação da madeira é bem difundida em vários tipos de pesquisas. Porém, poucos trabalhos estão mais disponíveis quando o assunto é estudar aspectos visuais de comprometimento do carvão em análise qualitativa e degradação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Como critério de seleção das variedades de madeira para este estudo, foram definidas em função de um gradiente de densidade básica, ou seja, envolvendo espécies de baixas, médias e altas densidades, nativas e exóticas, folhosas e coníferas, bem como de usos comerciais e não comerciais.

Dentre as espécies selecionadas, foram: (*Qualea* sp., *Aspidosperma* sp.), (*Erismia uncinatum*), (*Pinus* e *Eucalyptus*), (*Araucaria angustifolia*), (*Couratari* sp.), (*Dipteryx* sp., *Tabebuia* sp., *Peltogyne* sp., *Apuleia leiocarpa*, *Goupia glabra*, *Astronium lecointei*, *Hevea brasiliensis* e *Schizolobium parahyba*).

Essas quinze espécies foram tiveram a identificação anatômica prévia por especialistas da área. A Tabela 2 mostra as espécies deste estudo de acordo com a respectiva densidade básica encontrada na literatura.

Tabela 2 - Nomes comerciais e científicos e suas propriedades.

Nomes das Espécie			DB
	Comercial	Científico	g/cm ³
1	Cumaru	<i>Dipteryx odorata</i>	0,908 *
2	Ipê	<i>Tabebuia impetiginosa</i> sp.	0,840 *
3	Roxinho	<i>Peltogyne</i> sp.	0,740 *
4	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	0,710 *
5	Muiracatiara	<i>Astronium lecointei</i>	0,810 *
6	Garapeira	<i>Apuleia leiocarpa</i>	0,670 *
7	Peroba	<i>Aspidosperma</i> sp.	0,660 *
8	Mandioqueira	<i>Qualea</i> sp.	0,540 *
9	Tauari	<i>Couratari</i> sp.	0,500 *
10	Araucária	<i>Araucaria angustifolia</i>	0,458 *
11	Seringueira	<i>Hevea brasiliensis</i>	0,450 **
12	Cedrinho	<i>Erismia uncinatum</i>	0,480 *
13	Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> sp.	0,420 *
14	Pinus	<i>Pinus elliottii</i>	0,400 *
15	Guapuruvu	<i>Schizolobium parahyba</i>	0,255 ***

DB = Densidade Básica. Fonte: * (IPT, 2020), ** (Embrapa, 2020), *** (Embrapa, 2005).

3.1.1 Preparo dos materiais

As amostras foram temporariamente climatizadas até atingir a temperatura de 21 °C e umidade de 65%. para que as amostras estivessem mais homogêneas possível, chegando a 0% de umidade livre (seca) na madeira. Determinou-se o teor de umidade e mediu-se a temperatura da mufla antes de carbonizar e marcou-se o tempo até chegar até a temperatura final de estudo para obter a taxa de carbonização.

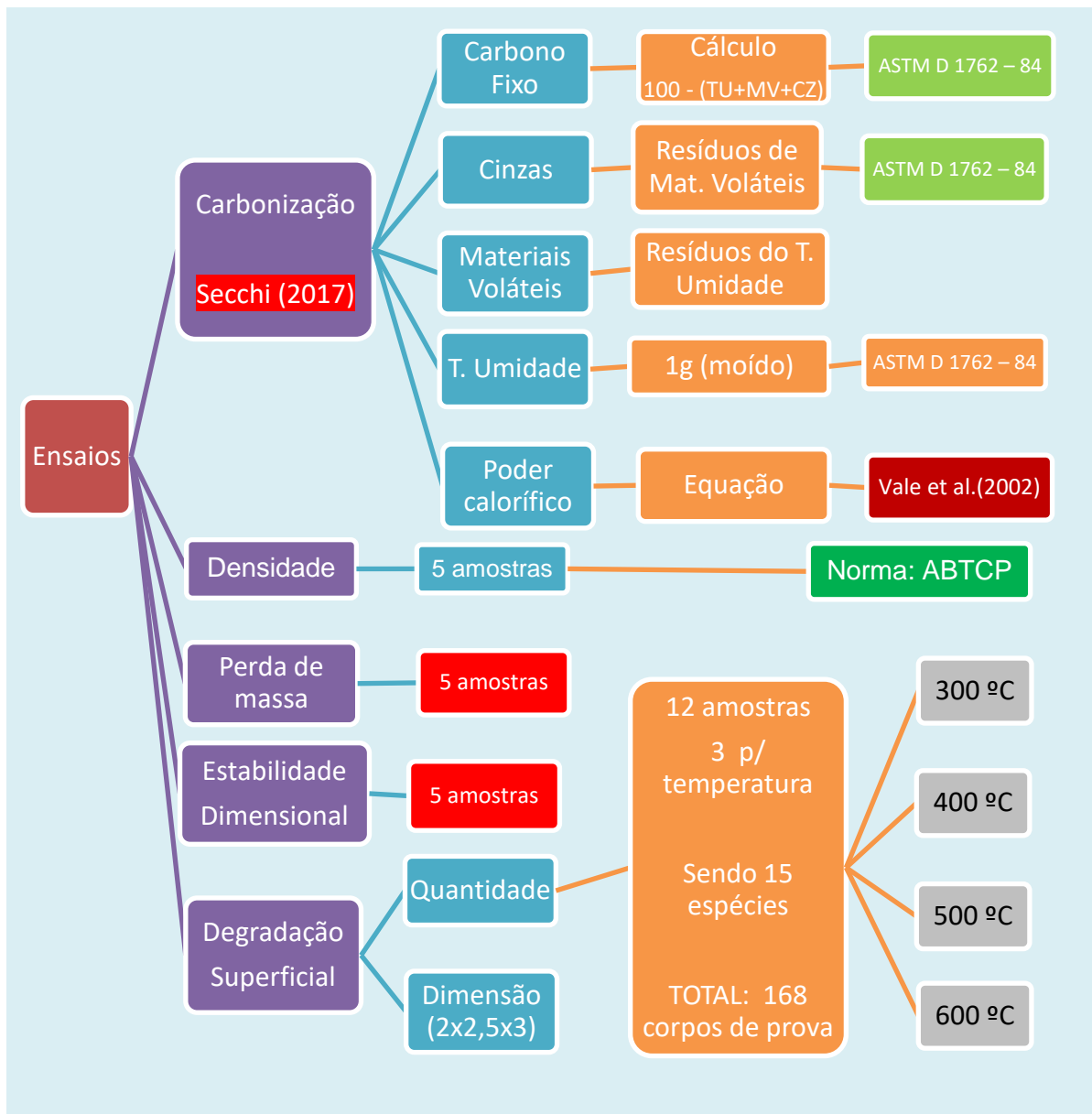
3.1.2 Corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados obedecendo os planos de corte transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial, com dimensões de 20 mm x 25 mm x 30 mm (radial x tangencial x longitudinal). O motivo destas dimensões é identificar os planos de corte anatômicos descritos anteriormente de modo que sejam identificáveis após a carbonização. Depois de cortados, foram lixados para retirar as imperfeições com lixa de granulometria 220.

3.2 Metodologia

Para a realização do procedimento metodológico, foram adotadas normas referentes aos diversos tipos de ensaios. A Figura 3 mostra, de forma esquemática, os ensaios realizados e as normas adotadas.

Figura 3 - Esquema dos ensaios e procedimentos normativos da pesquisa.



3.2.1 Densidade Básica

Foram realizados os ensaios de densidade básica das espécies com cinco repetições de cada espécie, após deixá-las por um período até que os corpos de prova atingissem o ponto de saturação das fibras de acordo com o método da balança hidrostática, norma ABTCP M 14/70 (1974).

Houve a utilização e adaptação da nomenclatura densidade básica de acordo com Serviço Florestal Brasileiro por meio do Laboratório de Produtos Florestais e da página eletrônica <<https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/madeiras-brasileiras>>, que consta

leve (abaixo de $0,5 \text{ g/cm}^3$), média ($0,5 \text{ g/cm}^3$ até $0,72 \text{ g/cm}^3$) e alta (acima de $0,72 \text{ g/cm}^3$) e do livro de autoria de Melo e Camargo (2016).

3.2.2 Carbonização

Os corpos de prova foram embrulhados em papel de alumínio, sendo identificado as amostras por caneta tinta permanente no próprio papel de alumínio. Posteriormente as amostras foram colocadas em estufa de circulação forçada, a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h para secagem. Para ocorrência da pirólise, o ensaio foi realizado em forno tipo mufla, dentro de um cadinho aço inox que conta com uma abertura na parte superior para permitir a saída dos voláteis, restringindo assim, a entrada de oxigênio no seu interior.

Vasconcelos et al. (2021) observou que em cadinhos de porcelana foi adequado para o processo de carbonização em $400 \text{ }^\circ\text{C}$ e $500 \text{ }^\circ\text{C}$, dois tempos, sendo 10 e 30 minutos de permanência dentro de mufla. Neste sentido, foi realizado na condição de tempo de permanência da temperatura final por 30 minutos.

As amostras foram carbonizadas até atingir as temperaturas entre $300 \text{ }^\circ\text{C}$, $400 \text{ }^\circ\text{C}$, $500 \text{ }^\circ\text{C}$ e $600 \text{ }^\circ\text{C}$. O tempo de cada temperatura final foi fixado em 30 minutos, com taxa de carbonização em média de $20^\circ\text{C} / \text{min}$. Após o processo de carbonização, as amostras ficaram, no mínimo, por 24 horas dentro da mufla desligada para esfriamento de forma natural.

3.2.3 Carbono Fixo

Para a determinação do carbono fixo, foi utilizado a norma ASTM D 1762-84, sobre a análise imediata, consistindo na determinação dos teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo por cálculo. O cálculo dessas três variáveis obteve o Carbono Fixo (C.F.) nas quatro temperaturas de carbonização.

3.2.4 Poder Calorífico

O poder calorífico foi calculado a partir da equação 1 do trabalho de Vale et al. (2002), utilizado para o carvão vegetal:

$$\text{PCS (cal/g)} = 4934,43 + (33,27 \times \text{CF}) \quad (1)$$

sendo, CF = teor de carbono fixo (%) e PCS = Poder Calorífico Superior

3.2.5 Diferença dimensional

Para a determinação da estabilidade dimensional, foi utilizado paquímetro para medir antes e depois de carbonizar a madeira. Foi calculada a diferença entre as dimensões volumétricas da madeira *in natura* e do carvão de cada espécie e nas temperaturas de 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C.

3.2.6 Perda de massa

Para a determinação da perda de massa ou rendimento, foi utilizado balança analítica. Foi calculada a diferença da massa inicial e final da carbonização de cada espécie nas temperaturas de 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C.

3.2.7 Degradação Visual

As imagens macroscópicas do lenho e do carvão foram obtidas mediante um microscópio estereoscópio com uma câmera acoplada usando escala padrão de 10 vezes e registradas as imagens obtidas e arquivadas em extensão "tiff". Essas imagens foram registradas para cada condição de temperatura.

Posteriormente, foi realizada a comparação das imagens utilizando o estéreo microscópio nas temperaturas para a análise dos danos ocorrido pela degradação antes e depois do processo de queima da madeira, com corpos de provas controle para efeito de comparação. A escala adotada é de 1 mm.

3.3 Análise Estatística dos Resultados

O teste de correlação, ao nível de 5% de significância, foi utilizado para avaliar a influência das temperaturas (300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C) nas propriedades físicas e químicas das 15 espécies de madeira consideradas na presente pesquisa.

Do teste de correlação entre as propriedades, observar se há ou não relação entre as propriedades físicas, químicas e a degradação visual. Foram adotados os testes *Tukey* e de correlação *Pearson* e Valor-p.

A interpretação da correlação de *Pearson*, com as propriedades estudadas neste trabalho pode ser: é um número real que varia de -1 até 1, atingindo a proximidade destes dois valores, sendo que mais forte é a relação da correlação do primeiro fator com o segundo valores próximos de -1 (decrecente) ou 1 (crescente). Em outras palavras, aumentando uma variável, aumenta-se outra variável quando é positivo o sinal; aumentando uma variável, diminui-se outra variável quando é negativo o sinal. Feito a análise de variância com a correlação chegou-se nos seguintes resultados significativos, tendo valores-p acima de 5% a correlação não é significativa e abaixo de 5% a correlação é significativa.

Além disso, foi extraído durante os ensaios, a densidade aparente para parametrizar e relacionar estatisticamente com outras propriedades estudadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

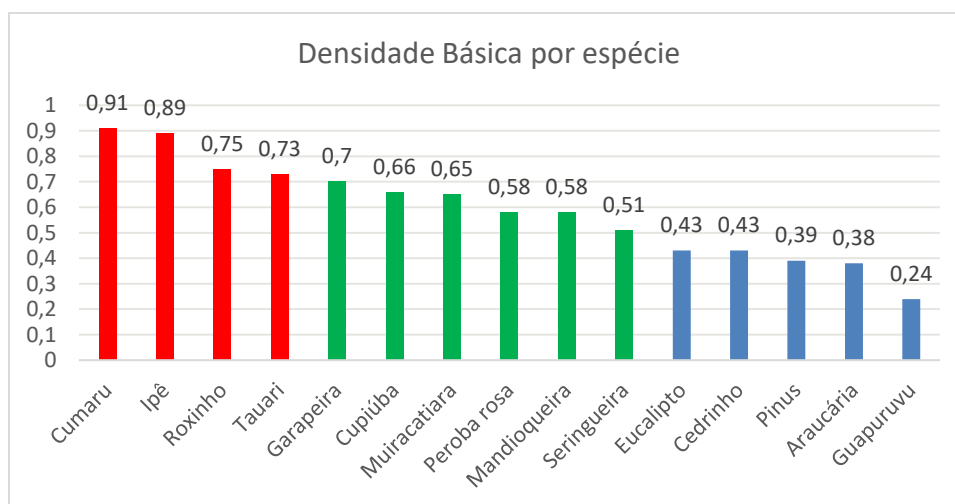
Os resultados analisados a seguir, foram agrupados em: Densidade básica, análise imediata, carbono fixo, perda de massa, diferença de dimensão, densidade aparente, comparação da degradação superficial durante a carbonização, análise estatística das temperaturas de 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C.

4.1 Densidade básica

A partir do ensaio de densidade básica das quinze espécies de madeira estudadas, um gradiente decrescente foi ordenado na Figura 4, a qual mostra os nomes científicos e os respectivos valores de densidade básica.

Em destaque nas cores: em azul são baixa densidade, em verde são média densidade e em vermelho são alta densidade.

Figura 4 - Densidade básica por espécie.



No gradiente de densidade, o cumarú (*Dipteryx odorata* - 0,912 g/cm³) foi a espécie que se apresentou como a mais densa e o guapuruvu (*Schizolobium parahyba* - 0,236 g/cm³) a menos densa, enquanto as demais espécies estão entre esses extremos. Comparado com dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), os valores obtidos das quinze espécies situaram-se dentro do esperado.

Da Silva et al. (2018) identificaram que a densidade básica do ipê a média foi de 0,97 g/cm³ e a muiracatiara 0,71 g/cm³, e quando carbonizado, a densidade

aparente do ipê apresentou 0,70 g/cm³ em 400 °C, 0,74 g/cm³ em 500 °C e para a muiracatiara apresentou 0,41 g/cm³ em 400 °C, 0,39 g/cm³, em 500°C.

4.2 Análise imediata

Os resultados da análise imediatas podem ser observadas nas Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6 mostrando as médias de Teor de Umidade (T.U.), Materiais Voláteis (M.V.), Teor de Cinza (Cinzas) nas temperaturas de 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C.

Comparando da literatura, os materiais voláteis na espécie muiracatiara (*Astronium lecointei*) esteve na média de 31,9% para 450 °C, 38,3% para 500 °C, e o ipê (*Tabebuia* spp.) 22,9% para 450 °C, 22,5% para 450 °C. Teor de cinzas para muiracatiara esteve em 1,3% para 450 °C e 1,4% para 500 °C, e ipê 1,2% para 450 °C e 1,4% para 500 °C. O carbono fixo na muiracatiara foi na média de 66,4% para 450 °C e 60,4% para 500 °C, na espécie ipê esteve na média de 75,7% para 450 °C e 76,3 para 500 °C (DA SILVA et al. 2018).

Tabela 3 - Valores médios da análise imediata em 300 °C.

	T.U. (%)	M.V. (%)	T.C. (%)	C.F. (%)
Cumaru	3,33	45,06	0,38	51,24
Ipê	2,69	51,20	0,63	45,48
Roxinho	3,81	40,27	0,38	55,54
Tauari	3,81	42,75	2,49	50,94
Garapeira	3,75	50,64	1,29	44,32
Cupiúba	3,60	42,60	1,02	52,78
Muiracatiara	4,20	42,51	1,32	51,97
Peroba rosa	3,76	43,91	0,44	51,89
Mandioqueira	4,50	52,78	0,94	41,78
Seringueira	4,57	44,30	1,43	49,70
Eucalipto	4,42	59,02	0,41	36,15
Cedrinho	5,15	49,47	1,47	43,91
Pinus	4,87	61,95	0,52	32,66
Araucária	5,02	45,04	0,70	49,23
Guapuruvu	4,98	56,06	0,79	38,17

T.U – Teor de Umidade, M.V. – Materiais Voláteis, T.C. – Teor de Cinzas, C.F. Carbono Fixo.

A Tabela 3 mostra que em 300 °C as espécies não seguiram à linearidade e a proporção ao gradiente da densidade básica em relação ao teor de umidade, o material volátil, cinzas e poder calorífico. Os valores médios tiveram variações distintas.

O Ipê teve o menor teor de umidade (2,69%), seguido do Cumaru (3,33%). Os maiores teores foram do Cedrinho (5,15%) e da Araucária (5,02%).

Os menores teores de materiais voláteis foram das espécies como o Roxinho (40,27%), Muiracatiara (42,51%), Cupiúba (42,60%) e o Tauari (42,75%). O Pinus teve o maior teor de materiais voláteis (61,95%), seguido por Eucalipto (59,02%) e Guapuruvu (56,06%).

A média do teor de cinzas teve variações nas espécies mais densas como os menores valores como o Cumaru e o Roxinho (0,38%) cada. A Peroba Rosa foi a quarta espécie (0,44%). Os maiores valores médios do teor de cinzas foram do Tauari (2,49%) e Cedrinho (1,47%) acompanhado pela Seringueira (1,43%).

Outras espécies como a Muiracatiara (1,32%) e a Garapeira (1,29%) tiveram acima de 1%. A Cupiúba (1,02%) e a Mandioqueira (0,94%) estiveram próximos de 1%. As demais como Ipê (0,63%) com alta densidade e Guapuruvu (0,79%), Araucária (0,70%), Pinus (0,52%) com baixa densidade, tiveram valores abaixo de 1%.

Não é possível afirmar a influência da densidade com os resultados sobre a umidade, materiais voláteis e cinzas do material carbonizado de forma individual. Apenas o agrupamento das espécies menos densas que são o Guapuruvu, Araucária e Pinus tiveram regularidade nas amostras pesquisadas diminuição do teor de cinzas em relação com o aumento da densidade básica dessas espécies.

O Carbono fixo das seguintes espécies em que teve menores valores foram: Pinus, Eucalipto, Guapuruvu. Os maiores valores foram Roxinho e Cupiúba. As espécies acima de 50% foram: Muiracatiara, Peroba Rosa, Cumaru, Tauari. Entre 45% e 50%: Seringueira e Araucária, Ipê. Por fim, na faixa abaixo de 45% e acima de 40%: a Garapeira, o Cedrinho e a Mandioqueira.

Tabela 4 - Valores médios da análise imediata em 400 °C.

	T.U. (%)	M.V. (%)	T.C. (%)	C.F. (%)
Cumaru	4,51	37,14	0,30	58,05
Ipê	4,49	29,18	1,11	65,22
Roxinho	4,48	37,04	0,37	58,11
Tuari	5,09	28,24	4,28	62,39
Garapeira	4,96	35,58	2,86	56,59
Cupiúba	4,88	37,55	0,87	56,71
Muiracatiara	5,02	33,04	1,11	60,83
Peroba rosa	6,09	31,60	1,45	60,86
Mandioqueira	5,34	32,99	0,59	61,07
Seringueira	5,21	31,58	2,06	61,14
Eucalipto	5,78	36,46	0,13	57,62
Cedrinho	6,11	35,84	2,31	55,74
Pinus	5,68	35,67	0,36	58,29
Araucária	4,89	31,67	0,63	62,81
Guapuruvu	5,96	31,78	1,91	60,35

T.U – Teor de umidade, M.V. – Materiais Voláteis, T.C. – Teor de Cinzas, C.F. - Carbono Fixo.

Na temperatura de 400 °C o Roxinho (4,48%) e o Ipê (4,49%) com valores próximos e o Cumaru (4,51%) foram as espécies com menores valores médios de umidade. Os maiores valores médios foram na sequência: o Cedrinho (6,11%) e a Peroba Rosa (6,09%).

Na temperatura de 400 °C, os materiais voláteis tiveram menores valores médios, foi o Tauari e o Ipê. Os maiores valores foram: a Cupiúba e o Cumaru, seguido por Roxinho. Acima dos 35% as espécies como o Eucalipto, o Pinus, o Cedrinho e a Garapeira, enquanto os valores entre 32% e 34% foram a Muiracatiara, Mandioqueira. As espécies acima de 31% foram: o Guapuruvu, a Araucária, a Peroba Rosa, e a Seringueira.

O Eucalipto foi a espécie que teve menor teor de cinzas (0,13%). A espécie que teve o maior valor médio foi o Tauari (4,28%). A Garapeira, o Cedrinho e a Seringueira estiveram acima de 2%. Entre 1% e 2% foram as espécies Guapuruvu, Peroba Rosa, Ipê e Muiracatiara (ambos 1,11%). Abaixo de 1% de teor de cinzas foram: a Cupiúba, a Araucária a Mandioqueira o Cumaru, seguido por Pinus e Roxinho, estando abaixo de 0,5%.

Não ocorreu de forma ordenada o acréscimo dos valores na temperatura de carbonização 400 °C em relação ao gradiente da densidade básica, nas seguintes variáveis dos teores: de umidade, dos materiais voláteis e de cinzas do material carbonizado de forma individual. Comparando com a temperatura de 300 °C ocorreu queda desses teores, resultando em maior percentual de carbono fixo. O menor valor médio do carbono fixo na temperatura de 400 °C foi Cedrinho (55,74%). O maior valor médio do carbono fixo foi do Ipê (65,22%). Ainda na faixa acima de 60% até 61% estão as espécies Peroba Rosa, Muiracatiara e Guapuruvu. Entre 61% e 62% estiveram as espécies: Seringueira e Mandioqueira. Acima de 62% de carbono fixo foram a Araucária e o Tauari. Seis espécies estiveram abaixo de 59% e acima de 56%, sendo o Pinus, o Cumaru, o Roxinho, o Eucalipto, a Cupiúba e a Garapeira.

Tabela 5 - Valores médios da análise imediata em 500 °C.

	T.U. (%)	M.V. (%)	T.C. (%)	C.F. (%)
Cumaru	6,97	24,11	1,93	66,99
Ipê	5,35	22,40	1,36	70,88
Roxinho	5,01	27,69	0,54	66,76
Tuari	6,36	23,08	6,35	64,21
Garapeira	5,73	27,19	3,16	63,92
Cupiúba	6,12	28,32	1,16	64,41
Muiracatiara	6,45	24,73	0,96	67,86
Peroba rosa	5,61	24,80	1,68	67,90
Mandioqueira	6,17	25,44	2,51	65,88
Seringueira	5,83	25,04	5,03	64,10
Eucalipto	5,61	28,05	0,92	65,43
Cedrinho	6,78	27,09	3,27	62,87
Pinus	5,70	25,01	3,57	65,73
Araucária	5,75	32,66	1,16	60,42
Guapuruvu	6,56	24,52	2,22	66,70

T.U – Teor de umidade, M.V. – Materiais Voláteis, T.C. – Teor de Cinzas, C.F. - Carbono Fixo.

Na temperatura de 500 °C, o Roxinho teve a menor umidade, seguido por Ipê. A maior umidade foi da espécie Cumaru, e logo após o Cedrinho. Acima de 5,5% de umidade estiveram a Peroba Rosa e o Eucalipto (ambos 5,61%), o Pinus, a Garapeira, a Araucária e a Seringueira. Acima de 6% estiveram as espécies: Cupiúba, Mandioqueira, Tauari, Muiracatiara e Guapuruvu.

Na temperatura de 500 °C, os materiais voláteis tiveram os menores valores médios em espécies como o Ipê e o Tauari. Os maiores valores médios foram a Araucária, a Cupiúba e o Eucalipto. As espécies que tiveram o percentual de 24% de teor de M.V. foram: Cumaru, Guapuruvu, Muiracatiara e Peroba Rosa. As espécies que tiveram acima de 25% de teor de materiais voláteis foram: Pinus Seringueira, e Mandioqueira. Por fim as espécies que tiveram 27% de materiais voláteis foram: Cedrinho, Garapeira e Roxinho.

O menor valor médio do teor de cinzas foi o Roxinho seguido pela Muiracatiara. Acima de 1% de teor de cinzas foram: a Araucária e a Cupiúba (ambas 1,16%), o Ipê,

a Peroba Rosa e o Cumaru. Os maiores valores médios do teor de cinzas foram o Tauari seguido pela seringueira. Outros valores foram abaixo de 4% como o Pinus, Cedrinho e a Garapeira. Abaixo de 3% as espécies foram: Mandioqueira e o Guapuruvu

A temperatura de 500 °C não seguiu a ordenação relacionada com a densidade básica, ou seja, o decréscimo da densidade não obedeceu ao decréscimo dos teores: de umidade, materiais voláteis e cinzas.

Na temperatura de 500 °C o menor valor de carbono fixo foi da Araucária enquanto o maior foi do Ipê. As espécies tiveram os valores entre essa faixa de aproximadamente 10% de Carbono Fixo. Acima de 62% foi o Cedrinho, Acima de 63% foi Garapeira. Acima de 64% as espécies foram a Seringueira, o Tauari e a Cupiúba. Acima de 65% foram o Eucalipto e o Pinus e a Mandioqueira. Acima de 66% foram o Roxinho, o Guapuruvu e o Cumaru. Por fim as espécies com 67% foram a Muiracatiara e a Peroba Rosa.

Tabela 6 - Valores médios da análise imediata em 600 °C.

	T.U. (%)	M.V. (%)	T.C. (%)	C.F. (%)
Cumaru	6,63	21,70	0,36	71,32
Ipê	5,22	16,60	1,25	76,93
Roxinho	6,04	20,98	0,65	72,33
Tauari	6,57	16,87	5,46	71,10
Garapeira	6,28	14,51	3,63	75,59
Cupiúba	6,63	15,86	1,31	76,20
Muiracatiara	6,51	19,08	0,83	73,58
Peroba rosa	5,48	16,54	1,08	76,90
Mandioqueira	7,33	19,89	3,09	69,69
Seringueira	6,54	16,98	2,34	74,14
Eucalipto	8,59	22,50	0,56	68,35
Cedrinho	6,94	20,06	3,86	69,14
Pinus	8,85	21,96	0,60	68,58
Araucária	7,91	16,39	1,11	74,59
Guapuruvu	8,88	17,63	2,35	71,14

T.U – Teor de umidade, M.V. – Materiais Voláteis, T.C. – Teor de Cinzas, C.F. - Carbono Fixo.

Na temperatura de 600 °C como era esperado ocorreu o aumento dos valores em relação as temperaturas de carbonização anteriores.

O menor valor foi do Ipê seguido por Peroba Rosa. Os maiores teores médios de umidade foram do Guapuruvu, Pinus e Eucalipto. As espécies que estiveram entre 7% e 8% de teor de umidade foram Mandioqueira e Araucária. Acima de 6% o teor de umidade médio foi registrado na maioria das espécies estudadas: Roxinho, Garapeira, Muiracatiara, Seringueira, Tauari, Cumaru e Cupiúba, Cedrinho totalizando oito espécies.

Os materiais voláteis na temperatura de 600 °C teve o menor valor médio na Garapeira. O maior valor foi no Eucalipto. Apenas a Cupiúba esteve acima de 15%. Cinco espécies estiveram acima de 16% sendo: Araucária, Ipê, Peroba rosa e Tauari e Seringueira. Apenas o Guapuruvu esteve acima de 17%. Acima de 19% foram a Muiracatiara e a Mandioqueira. Acima de 20% foram o Cedrinho e o Roxinho. Acima de 21% foram o Cumaru e o Pinus.

O teor de cinzas teve o menor valor no Cumaru, seguido por Eucalipto, Pinus, Roxinho e Muiracatiara. O maior valor foi no Tauari. Acima de 3% foram as espécies Cedrinho, Garapeira e Mandioqueira. Acima de 2% foi Guapuruvu e Seringueira. Acima de 1% foram o Peroba Rosa, Araucária, Ipê e Cupiúba sendo cinco espécies. O Carbono fixo teve o menor valor médio com o Eucalipto e o segundo menor valor o Cedrinho. O maior valor médio foi o Ipê seguido pela Peroba Rosa e a Cupiúba. Abaixo de 75% foi a Garapeira. Abaixo de 74% foram a Araucária e a Seringueira. Abaixo de 73% foi a Muiracatiara. Abaixo de 72% foi o Roxinho. Abaixo de 71% foram o Cumaru o Guapuruvu e o Tauari. Abaixo de 69% foi a Mandioqueira e o Cedrinho.

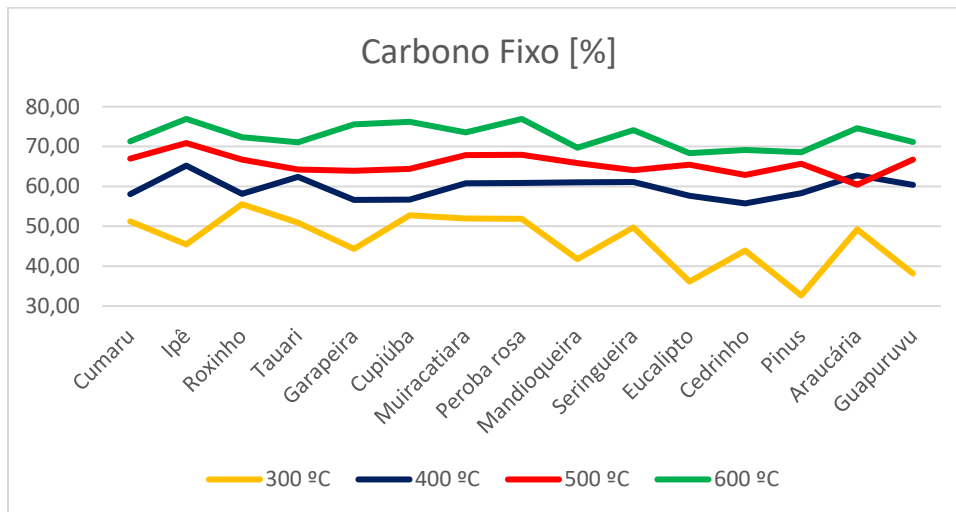
4.2.1 Carbono Fixo

A Figura 5 mostra as quatro temperaturas de carbonização sendo que em três delas (400 °C, 500 °C e 600 °C) o Ipê teve o maior valor de Carbono Fixo.

O menor valor foi na temperatura de 300 °C sendo a espécie do Pinus. Com a exceção da Araucária que teve menor valor na temperatura de 500 °C em relação a 400 °C, as demais espécies tiveram o comportamento de aumento do Carbono Fixo à medida que teve o aumento da temperatura de carbonização. Todas as espécies

tiveram os maiores valores no teor do Carbono Fixo em 600 °C e os menores valores em 300 °C.

Figura 5 - Carbono Fixo nas quatro temperaturas de carbonização.



4.2.2 Poder calorífico

A partir da equação que utiliza o Carbono Fixo obtido conforme sugerido na Equação 1 em Materiais e Métodos, após realizado os cálculos tem os resultados mostrado na Tabela 7, na ordem do gradiente da densidade básica das espécies, sendo a mais densa o *Dipteryx* sp. até a espécie de menor densidade no estudo, sendo a *Schizolobium parahyba*.

Tabela 7 - Valores médios de Poder Calorífico em [kcal/kg] nas temperaturas de carbonização.

	300°C	400°C	500°C	600°C
Cumaru	6639,08	6865,61	7163,08	7307,16
Ipê	6447,39	7104,38	7292,75	7493,89
Roxinho	6782,18	6867,87	7155,38	7341,00
Tuari	6629,29	7010,27	7070,59	7299,98
Garapeira	6408,99	6817,22	7061,01	7449,19
Cupiúba	6690,55	6821,10	7077,21	7469,63
Muiracatiara	6663,55	6958,30	7192,12	7382,43
Peroba rosa	6660,76	6959,12	7193,59	7492,73
Mandioqueira	6324,37	6966,27	7126,31	7253,02
Seringueira	6588,11	6968,71	7067,04	7400,91
Eucalipto	6137,16	6851,49	7111,14	7208,39
Cedrinho	6395,40	6788,87	7025,98	7234,85
Pinus	6021,08	6873,74	7121,10	7216,23
Araucária	6572,36	7024,04	6944,63	7416,07
Guapuruvu	6204,35	6942,39	7153,50	7301,13

O poder calorífico foi calculado a partir da equação em função do Carbono Fixo. Nota-se que à medida que aumentou a temperatura de carbonização proporcionalmente aumentou os valores do poder calorífico.

Comparando carbonização na temperatura de 300 °C, o menor valor foi 6021,08 kcal/kg e o maior valor foi o Roxinho com 6782,18 kcal/kg. Todos os valores nesta temperatura estiveram acima de 6000 kcal/kg.

A carbonização em 400 °C teve o menor valor para a Garapeira com 6788,87 kcal/kg e o maior valor para o Ipê com 7104,38 kcal/kg. Outras duas espécies estiveram acima de 7000 kcal/kg, sendo a Araucária com 7024,04 kcal/kg e o Tauari com 7010,27 kcal/kg.

O poder calorífico no valor de 4670 kcal/g na espécie *Araucária Angustifolia* (Bert.) O. Kuntze, com a densidade básica da madeira 0,425 g/cm³ (MATTOS et al., 2006). Enquanto o autor Carvalho avaliou o poder calorífico da Peroba-Rosa (*Aspidosperma polyneuron*) em 4.750 kcal/kg. O estudo de Numazawa (1990) para a cupiúba (*Goupia glabra*) na temperatura de 400 °C em amostras de galhos com diâmetros entre 10 e 15 cm tiveram poder calorífico de 7460 kcal/kg e densidade de 0,48 g /cm³.

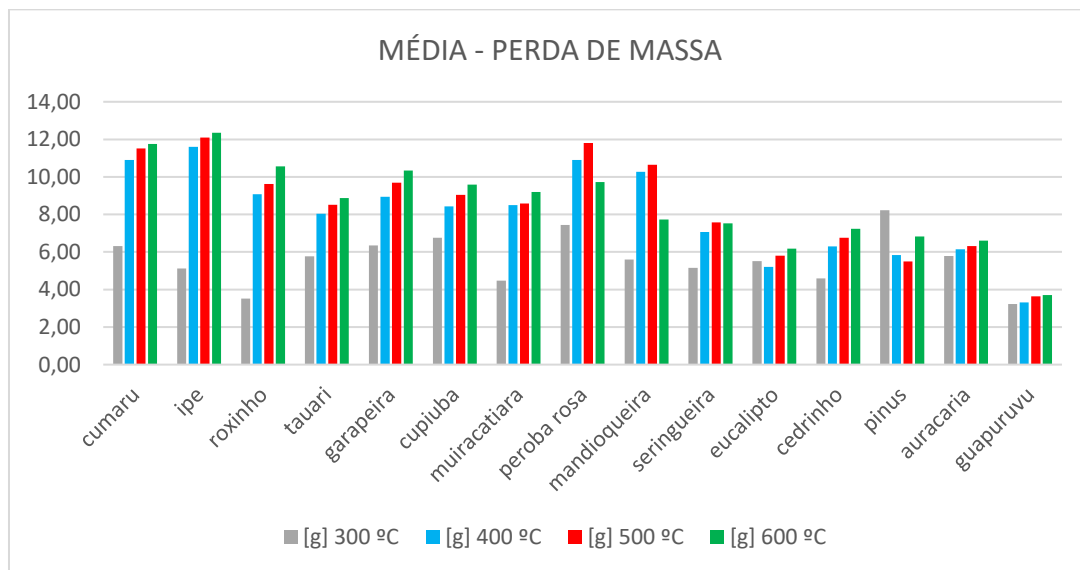
Na temperatura de carbonização em 500 °C o menor valor foi 6944,63 kcal/kg da espécie Araucária e o maior valor foi 7292,75 kcal/kg da madeira Ipê.

Na temperatura de 600 °C a espécie que teve o menor valor do Poder calorífico foi o Eucalipto com 7208,39 kcal/kg. Na faixa entre 7200 kcal/kg e 7300 kcal/kg, o Pinus teve (7216,07) kcal/kg, o Cedrinho (7234,85) kcal/kg e o Tauari (7299,98) kcal/kg. O maior valor do Poder calorífico foi o Ipê com 7493,89 kcal/kg, logo em seguida foi a Peroba Rosa com 7492,73 kcal/kg. Quirino et al. (2005) pesquisaram as espécies como Cumaru (*Dipteryx odorata*) com o poder calorífico superior 4.828 kcal/kg, poder calorífico inferior 3.722 kcal/kg e o teor de umidade 17,7% e o Ipê (*Tabebuia* spp.) com (PCS) 4.957 kcal/kg, (PCI) 4.065 kcal/kg e (DB) 13,6%.

4.3 Perda de massa

A perda de massa pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Perda de massa das espécies após a carbonização.



A Figura 6 mostra de forma paramétrica seguindo a densidade básica das espécies em que ocorreu a perda de massa. Nesse gráfico é possível observar que há uma tendência de perda de massa com o aumento da temperatura. O comparativo demonstra que não existe o mesmo ordenamento sequencialmente. A razão pode ser os componentes químicos presentes em cada espécie de maneira distinta nas amostras estudadas.

A Peroba Rosa e a Mandioqueira não seguiram a ordem decrescente na média de perda de massa em gramas. Porém, ao comparar a espécie mais densa que é o Cumaru e a menos densa como o Guapuruvu, é possível notar que existe maior perda de massa na espécie mais densa (Cumaru).

Com relação as temperaturas, o Pinus na temperatura de 300 °C mostrou maior do que as outras temperaturas (400 °C, 500 °C e 600 °C), inclusive a temperatura de 500 °C teve a menor perda de massa. A Peroba Rosa, a Mandioqueira e o Eucalipto foram outras espécies que não tiveram linearidade ao ter perda de massa relacionado com o aumento da temperatura de carbonização. Enquanto as espécies Peroba Rosa e Mandioqueira, suas médias de perda de massa em 600 °C foram menores, comparada com as temperaturas de 400 °C, 500 °C e 600 °C, essas três temperaturas tiveram linearidade ao aumentar a temperatura e o aumento da perda de massa. Já o Eucalipto apenas na temperatura de 300 °C teve maior perda de massa comparada com as outras três temperaturas de carbonização.

A espécie densa como o Roxinho (3,51 g), teve a segunda menor perda de massa em 300 °C no rol das espécies estudadas, estando apenas da espécie Guapuruvu (3,23 g), com a menor densidade básica do estudo realizado. O Pinus teve a maior perda de massa na temperatura de 300 °C, com o valor de 8,23 g. A segunda espécie com maior perda de massa foi a Peroba Rosa com o valor de 7,44 g. O Cumaru, de maior densidade foi a terceira espécie com maior perda de massa (6,31 g) em 300 °C de carbonização.

Na temperatura de 400 °C, a menor perda de massa foi do Guapuruvu (3,32 g), Pinus (5,49 g) e Eucalipto (5,80 g), consideradas espécies de baixas densidades e as espécies Pinus e Eucaliptos sendo exóticas, que excluindo-as, a espécie Araucária passa a ser a segunda com menor perda de massa. Na mesma temperatura de carbonização o Cumaru (10,90 g) e o Ipê (11,60 g) foram as que tiveram maior perda de massa. Peroba Rosa (10,90 g) e Mandioqueira (10,27 g) também tiveram altas perdas de massa, demonstrando que não necessariamente a densidade foi o fator da perda de massa durante o processo de carbonização da madeira.

O mesmo ocorreu na temperatura de 500 °C tendo as espécies o mesmo comportamento. O Guapuruvu continuou sendo a espécie de menor densidade e menor perda de massa, seguido por Pinus (5,49 g) possuindo a terceira menor

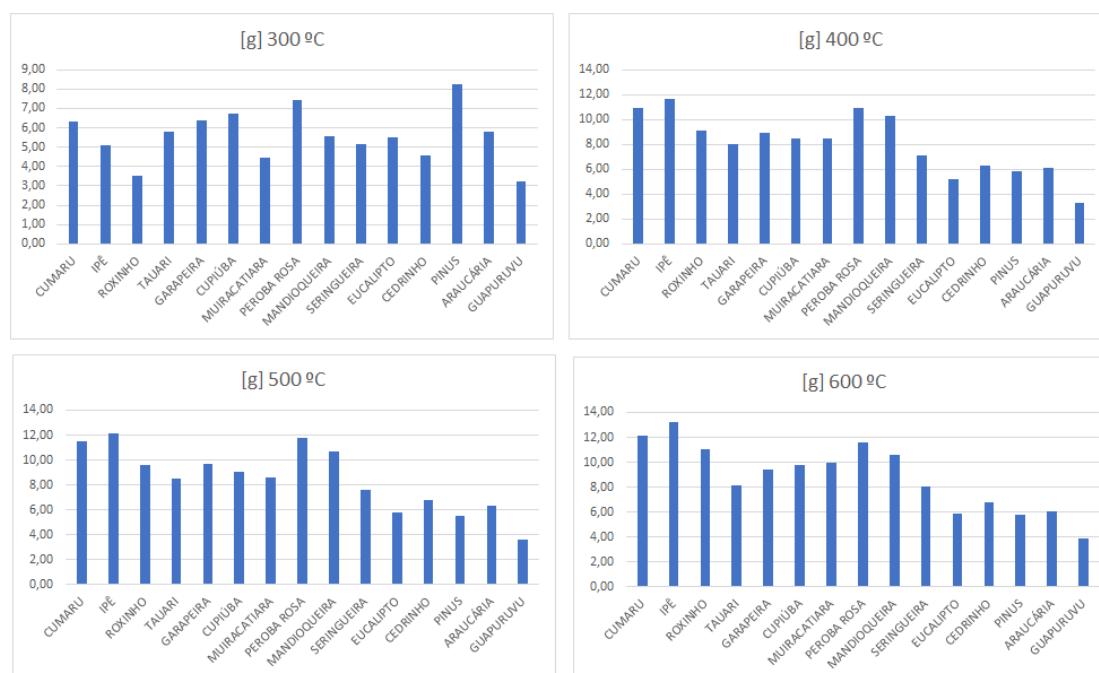
densidade. O Ipê, apesar de possuir a segunda maior densidade foi a que teve maior perda de massa (12,09 g), seguido por Peroba Rosa (11,81 g).

Na temperatura de 600 °C, persistiu a menor perda de massa para o Guapuruvu (3,92 g), a segunda espécie com menor perda de massa foi o Pinus (5,79 g) e a terceira espécie sendo o Eucalipto (5,92 g). O Ipê continuou sendo a espécie com maior perda de massa (13,21 g) seguido por Cumaru (12,15 g). Excluindo da comparação as espécies exóticas (Pinus e Eucalipto), o Cumaru e o Tauari, houve um declínio das perdas de massa na medida que as espécies tivessem menor densidade básica.

No gráfico é possível observar em outras espécies, como o Tauari e a Garapeira tiveram um salto de perda de massa entre 300 °C e 400 °C, da mesma forma como o Cumaru, Ipê, Roxinho, Muiracatiara, a Peroba Rosa e Mandioqueira. A Cupiúba, a Seringueira e o Cedrinho tiveram alta no acréscimo de perda de massa nas duas temperaturas, porém com menor salto, comparado com as demais descrita anteriormente. A Araucária e o Guapuruvu tiveram ligeira alta, não só nas temperaturas de 300 °C e 400 °C, como também em 500 °C e 600 °C.

Em se tratando de pequenas altas e de forma gradativa, as espécies como Cumaru, Ipê, Roxinho, Tauari, Garapeira, Cupiúba, Muiracatiara, Eucalipto, Cedrinho tiveram esse comportamento nas temperaturas de 400 °C e 500 °C e 600 °C como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Perda de massa em gramas nas quatro temperaturas de carbonização.



De acordo com a literatura, como demonstra a pesquisa de Vasconcelos et al. (2021), a perda de massa em algumas espécies demonstrou ser mais homogênea do que outras que podem ser mais heterogêneas quando carbonizadas.

4.4 Diferença de dimensão na carbonização

A transformação da madeira em carvão promoveu a diminuição e deformação nas dimensões dos corpos de prova no processo de carbonização. Porém, quatro espécies tiveram comportamento contrário as outras madeiras em estudo. Para ilustrar essas observações, foram selecionadas três repetições das quinze espécies e calculado a diferença em centímetros. A espécie Muiracatiara teve aumento em uma das dimensões nas temperaturas de 400 °C, 500 °C e 600 °C, enquanto o Guapuruvu teve aumento dimensional nas temperaturas 400 °C, 500 °C e 600 °C. Os valores do aumento na deformação são negativos e estão destacados em vermelho nas tabelas a seguir. Não foi notada a relação com a densidade básica (Figura 4) das espécies e a mudança do tamanho dimensional (Tabelas 8-11).

Tabela 8 - Diminuição das dimensões volumétricas em 300°C.

	AMOSTRA 1 [cm]			AMOSTRA 2 [cm]			AMOSTRA 3 [cm]		
Cumaru	0,07	2,23	0,87	0,66	1,27	4,02	0,82	0,73	4,67
Ipê	3,84	5,62	3,89	4,26	6,35	4,37	3,69	5,60	4,06
Roxinho	1,94	3,06	2,49	2,95	3,58	3,54	3,29	2,95	4,06
Tauari	4,80	4,90	4,47	4,54	5,02	3,38	4,77	4,49	4,15
Garapeira	0,13	1,79	0,75	2,52	3,53	3,74	2,45	3,59	4,24
Cupiúba	1,16	2,35	0,10	2,70	5,03	4,04	3,23	5,48	5,73
Muiracatiara	1,57	2,07	1,52	1,55	3,49	3,17	5,61	-2,28	4,09
Peroba rosa	3,67	4,78	3,05	4,99	4,77	5,24	4,13	5,18	4,39
Mandioqueira	2,58	2,56	0,05	5,67	6,82	3,40	5,30	5,71	4,09
Seringueira	3,37	3,91	0,85	4,59	4,45	3,96	4,12	3,43	4,08
Eucalipto	2,52	4,11	0,59	2,05	1,20	3,60	2,76	0,84	5,27
Cedrinho	1,72	4,72	1,23	2,59	3,88	3,62	2,51	3,99	3,91
Pinus	1,50	1,42	0,08	5,80	5,07	4,28	5,60	6,61	4,36
Araucária	2,83	3,42	1,32	3,54	5,32	4,41	4,00	5,87	4,60
Guapuruvu	2,01	-1,50	3,31	1,85	3,03	5,89	1,85	-1,07	4,98

O cálculo da diferença dimensional do volume antes e depois das amostras mostraram comportamento diverso entre algumas espécies. As espécies na temperatura de 300 °C apresentaram diminuição em seus volumes com exceção do Guapuruvu, e Muiracatiara, em que ocorreu aumento dimensional. A comparação por densidade básica não mostrou linearidade nas mudanças dimensionais no volume. O Guapuruvu teve duas amostras com aumento. A Mandioqueira, Pinus e Ipê tiveram os maiores valores na diminuição das dimensões, sendo que o ipê teve nas três amostras (acima de seis centímetros). A mandioqueira, e o cumaru tiveram os menores valores em suas dimensões (0,05 e 0,07 cm respectivamente), seguido pela Cupiúba (0,10 cm).

Tabela 9 - Diminuição das dimensões volumétricas em 400°C.

	AMOSTRA 1 [cm]			AMOSTRA 2 [cm]			AMOSTRA 3 [cm]		
Cumaru	2,10	1,04	5,03	0,46	2,38	4,38	-0,57	0,72	4,78
Ipê	4,66	6,07	5,12	4,05	6,18	3,77	3,74	6,31	3,74
Roxinho	3,25	2,98	4,87	2,38	2,84	2,57	3,16	2,14	4,18
Tauari	5,01	5,02	4,32	4,62	4,45	4,06	4,59	4,38	4,53
Garapeira	1,98	2,84	4,83	2,42	3,74	4,01	2,04	2,96	4,40
Cupiúba	2,65	4,49	5,35	3,30	2,72	3,99	3,28	1,91	4,72
Muiracatiara	1,37	2,96	4,35	0,84	-3,13	3,19	-0,89	3,11	4,16
Peroba rosa	4,37	4,94	4,76	4,13	4,51	3,35	4,48	5,37	4,58
Mandioqueira	5,08	5,63	4,27	5,62	5,99	3,70	4,56	6,71	4,20
Seringueira	6,03	4,43	4,92	2,24	1,28	3,76	4,35	5,13	4,25
Eucalipto	1,11	2,23	0,08	1,65	1,60	2,95	-1,08	2,11	4,45
Cedrinho	2,76	3,80	4,93	2,76	4,16	3,54	2,23	3,24	4,24
Pinus	4,34	5,86	5,69	4,23	6,40	3,80	4,61	7,24	4,30
Araucária	4,53	6,48	5,91	0,99	1,24	0,43	4,55	6,04	4,44
Guapuruvu	2,50	2,98	5,46	0,44	1,10	0,31	2,12	0,51	4,71

Na temperatura de 400 °C, as espécies tiveram diminuição, sendo que as espécies Cumaru, Muiracatiara e Eucalipto tiveram aumento dimensional. As espécies que tiveram as diminuições em uma das dimensões de volume foram: Pinus com a maior diferença (7,24 cm) seguido por, Mandioqueira (6,71 cm), Ipê (6,31 cm e 6,07 cm em cada amostra) e Araucária (6,48 cm e 6,04 cm em cada amostra). O Eucalipto teve a menor diferença (0,08 cm) na diminuição da dimensão do volume, seguido por Guapuruvu (0,31 cm) e Araucária (0,43 cm).

Tabela 10 - Diminuição das dimensões volumétricas em 500°C.

	AMOSTRA 1 [cm]			AMOSTRA 2 [cm]			AMOSTRA 3 [cm]		
Cumaru	1,16	1,80	0,03	0,44	2,31	3,89	0,53	0,86	4,65
Ipê	2,08	4,70	1,61	3,58	6,50	3,95	4,03	6,37	3,91
Roxinho	1,27	2,14	0,11	2,54	3,18	3,40	3,21	3,27	4,01
Tuari	1,95	3,92	3,49	4,16	5,76	3,92	4,69	4,44	4,03
Garapeira	4,81	4,56	4,14	1,70	3,21	3,60	2,85	2,77	3,96
Cupiúba	1,18	3,48	-0,04	1,41	4,45	4,06	3,25	4,33	4,55
Muiracatiara	-1,83	2,91	3,63	1,67	3,19	1,70	1,09	-2,05	3,45
Peroba rosa	3,17	5,42	0,46	4,35	5,14	4,09	4,48	4,48	4,00
Mandioqueira	1,87	7,09	2,92	4,90	7,61	3,90	4,45	6,44	4,42
Seringueira	0,09	0,89	1,60	5,98	4,40	4,03	4,18	5,76	4,40
Eucalipto	3,48	5,39	2,80	1,56	1,35	3,04	0,50	2,11	4,58
Cedrinho	1,03	1,11	0,10	2,79	5,17	3,44	2,71	2,99	4,37
Pinus	1,72	2,99	2,76	5,17	5,44	3,42	4,90	5,50	4,72
Araucária	3,31	1,45	-1,41	4,43	6,46	3,99	3,39	5,13	4,54
Guapuruvu	1,34	-0,13	2,22	-0,16	2,37	3,74	-0,16	2,62	4,54

Na temperatura de 500 °C as espécies Cupiúba, Mandioqueira, Araucária e Guapuruvu tiveram aumento dimensional em suas amostras. As demais seguiram diminuição nas dimensões volumétricas. Foram os casos do Cumaru que teve a menor diferença em centímetros em três amostras (0,03 cm na amostra 1), (0,44 cm na amostra 2) e (0,53 cm e 0,86 cm na amostra 3), Seringueira (0,09 cm e 0,89 cm na amostra 1) e Roxinho (0,11 cm), enquanto o Eucalipto apresentou a menor diferença na amostra 3 (0,50 cm). As maiores diferenças foram encontradas na Mandioqueira (7,61 cm e 7,09 cm em duas amostras respectivamente e 6,44 na terceira amostra), Ipê (6,50 cm e 6,37 cm em duas amostras), Araucária (6,46 cm).

Tabela 11 - Diminuição das dimensões volumétricas em 600°C.

	AMOSTRA 1 [cm]			AMOSTRA 2 [cm]			AMOSTRA 3 [cm]		
Cumarú	0,43	1,69	7,80	1,05	0,93	5,48	0,82	0,73	4,67
Ipê	4,07	6,03	7,60	3,80	5,73	4,96	4,35	6,40	4,47
Roxinho	3,21	2,95	7,52	3,38	2,71	4,90	3,26	3,78	5,19
Tauari	4,07	3,63	5,00	5,38	5,07	5,08	4,56	5,48	4,72
Garapeira	4,03	1,86	7,66	2,61	3,46	4,76	2,58	3,80	4,45
Cupiúba	4,21	2,76	8,38	3,21	5,79	5,53	3,23	5,48	5,73
Muiracatiara	3,44	-1,13	8,06	2,65	-1,17	4,08	0,93	-1,30	4,29
Peroba rosa	4,37	4,94	4,76	4,70	4,19	4,82	4,99	4,77	5,24
Mandioqueira	5,08	5,63	4,27	5,39	5,52	4,11	5,31	5,98	4,61
Seringueira	4,21	2,56	8,03	4,75	6,13	5,02	5,26	6,15	4,93
Eucalipto	-1,11	3,57	5,58	1,98	0,35	4,78	2,76	0,84	5,27
Cedrinho	2,76	3,80	4,93	2,59	2,75	5,34	1,31	2,85	4,73
Pinus	1,43	9,30	5,33	4,42	5,43	6,24	5,58	6,87	5,31
Araucária	5,15	5,52	5,75	5,10	6,08	5,50	5,26	6,35	4,50
Guapuruvu	1,54	2,76	8,80	2,72	1,60	5,75	1,85	3,03	5,89

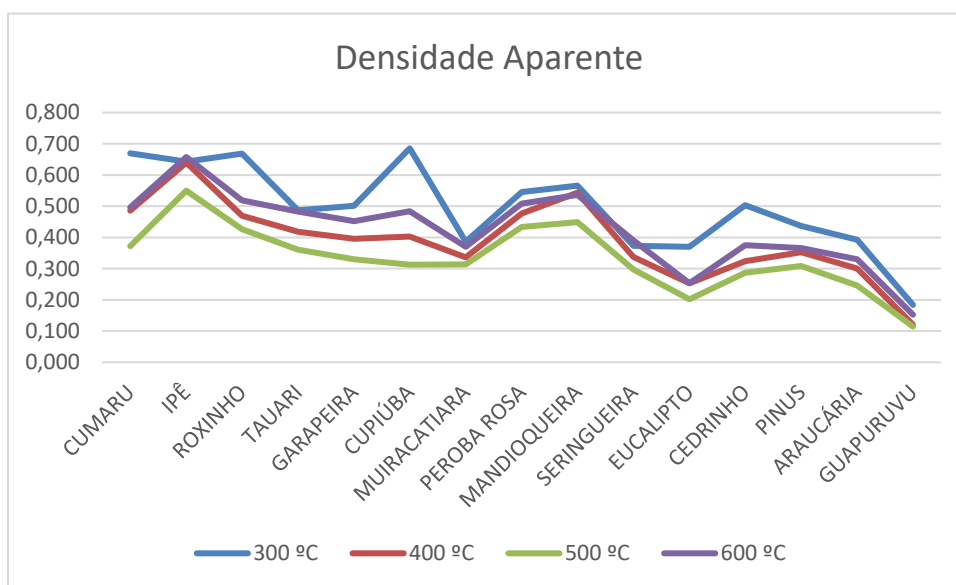
Na temperatura de 600 °C as espécies Muiracatiara e Eucalipto tiveram aumento dimensional em suas amostras. As demais seguiram diminuição nas dimensões volumétricas. O cálculo da diferença na diminuição das dimensões no volume teve os maiores valores no Guapuruvu (8,80 cm), Cupiúba (8,38 cm), na Muiracatiara (8,06 cm) e na Seringueira (8,03 cm) e as menores diferenças foram: Eucalipto (0,35 cm na amostra 2 e 0,84 cm na amostra 3) e Cumaru (0,43 cm na amostra 1 e 0,82 cm; 0,73 cm na amostra 3 e 0,93 cm na amostra 2).

Das amostras estudadas, somente a Mandioqueira teve alta diferença de dimensão quando carbonizada à 500 °C nas amostras estudadas (acima de 7 cm) e Cupiúba e Muiracatiara, Seringueira e Guapuruvu na temperatura de 600 °C (acima de 8 cm) sendo possível notar o aumento em relação ao acréscimo de temperatura comparado nas situações de 300 °C, 400 °C.

4.4.1 Densidade Aparente

A densidade aparente nas quatro temperaturas de queima estudadas (Figura 8) mostrou-se menor em relação a densidade básica antes de carbonizadas. Na temperatura de 300 °C foi a maior e à medida que aumentava a temperatura o gradiente da densidade aparente diminuía.

Figura 8 - Densidade Aparente após carbonização.



Algumas espécies não tiveram o mesmo comportamento, como foram os casos da Cupiúba e do Ipê. Outras espécies tiveram comportamentos similares quando aumentada a temperatura de carbonização, sendo mais perceptível no gráfico nas temperaturas de 400 °C, 500 °C e 600 °C.

A Peroba Rosa, a Mandioqueira, o Cedrinho tiveram aumentos na Densidade Aparente quando comparadas com as espécies que antecederam na ordenação do gradiente de densidade básica. O Roxinho teve aumento somente na temperatura de carbonização de 300 °C.

O Cumarú sendo a espécie com a maior densidade básica em estudo, foi a primeira a ser plotada no gráfico. Seus valores da densidade aparente tiveram comportamento diferente em 300 °C comparado com as outras temperaturas de carbonização. Porém o Cumarú foi a espécie com maior densidade aparente, com a exceção de Cupiúba na mesma temperatura (300 °C), enquanto nas demais temperaturas, os valores estiveram abaixo do Ipê e do Roxinho.

















4.4.2 Comparação da degradação superficial

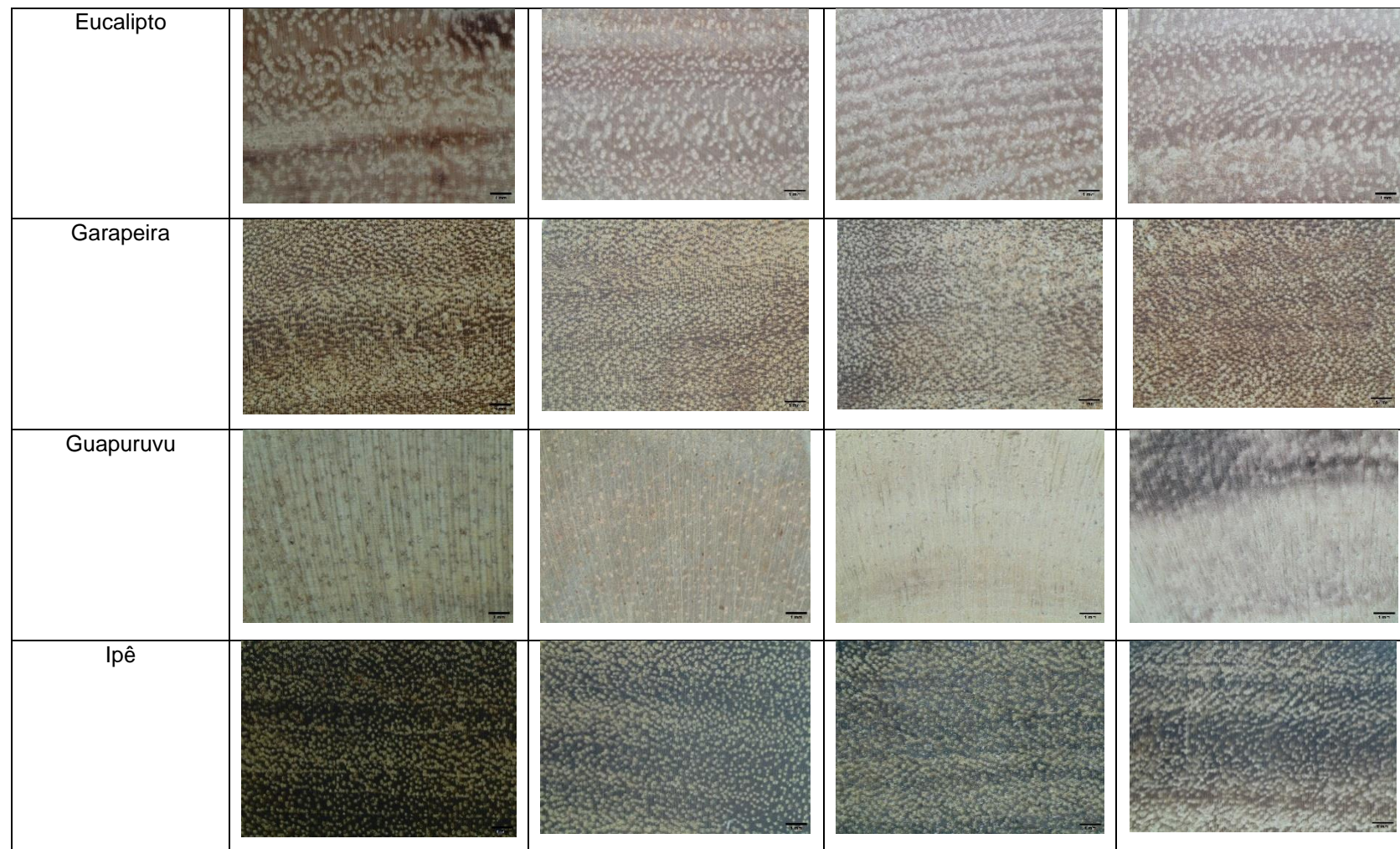
As imagens a partir da Tabela 12 são apresentadas no Plano Transversal, nas cinco situações: *in natura*, 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C. Em espécies que não ocorreram danos, como rompimentos e fissuras, a identificação pode ser facilitada.

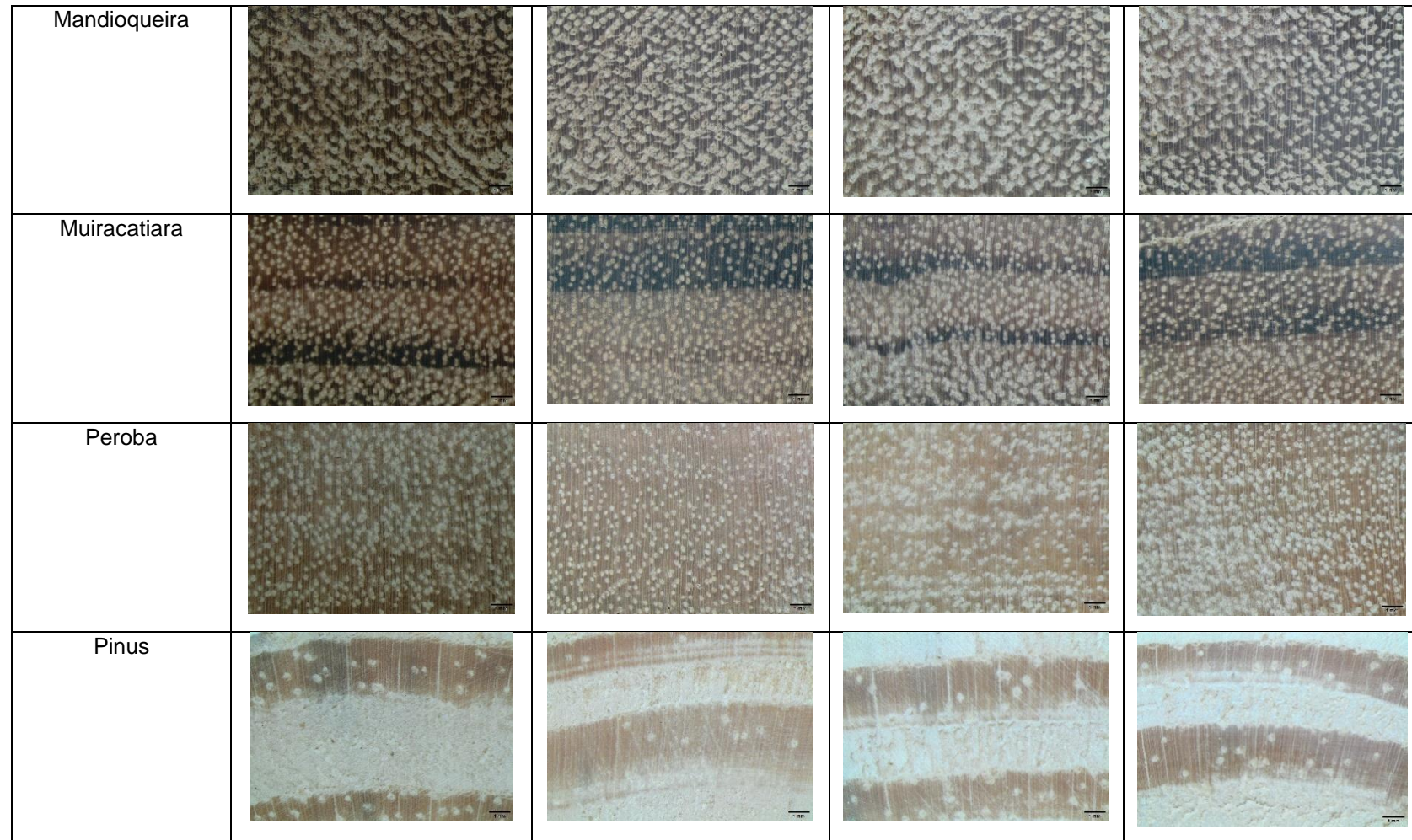
Soares et al. (2014) comprovou que o carvão está correlacionado com componentes químicos como nitrogênio, enxofre, hidrogênio/carbono, siringil e guaiacil. Sendo assim, essa pode ser a possível explicação pela decomposição e degradação da madeira dando o aspecto visual mostrado nas tabelas a seguir.

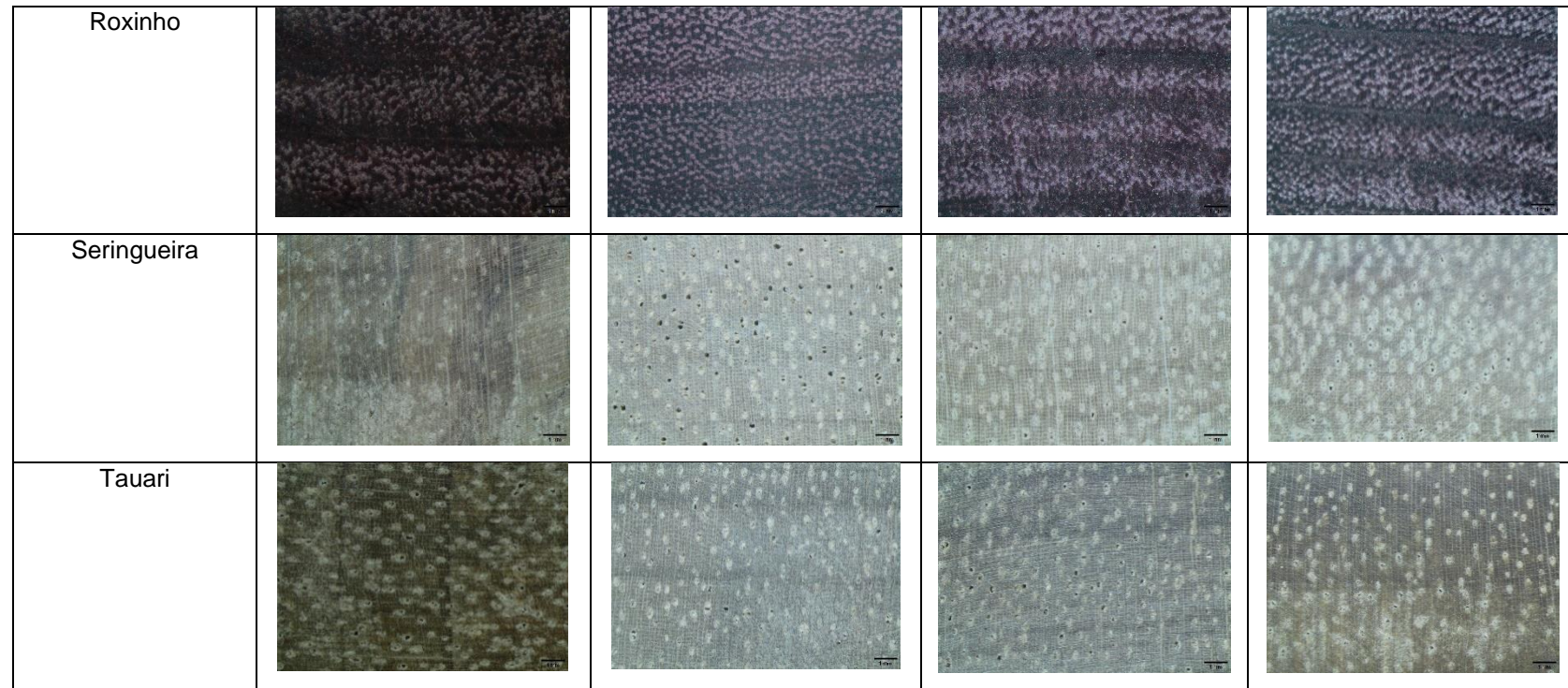
Acima de 400 °C, o carvão precisa de mais aquecimento para eliminar mais alcatrão e, assim, aumentar o teor de carbono fixo do carvão para cerca de 75%, sendo valor satisfatório para carvão comercial de boa qualidade. Para eliminar o alcatrão ainda impregnado na madeira carbonizado, existe a necessidade de ser submetido na temperatura em torno de 500°C, completando assim a etapa de carbonização (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 1985).

Tabela 12 - Imagens do plano anatômico transversal das espécies in natura (escala 1mm).

Araucária				
Cedrinho				
Cumaru				
Cupiúba				


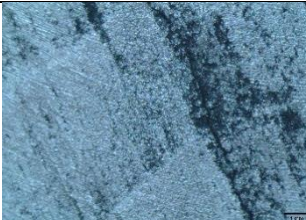



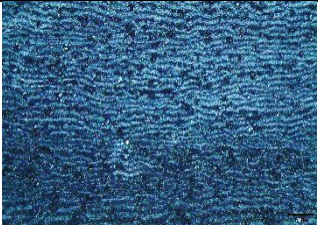



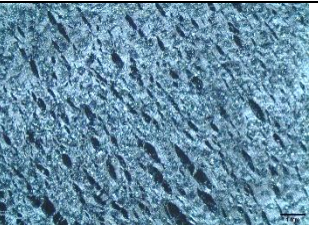
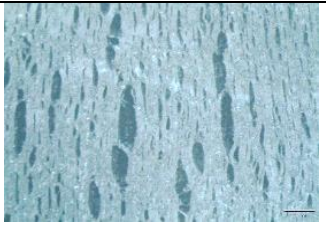

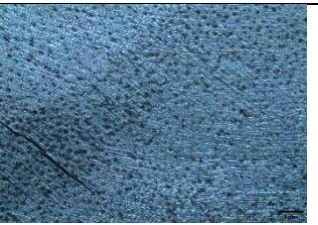







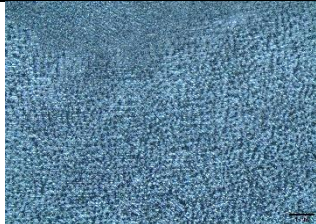




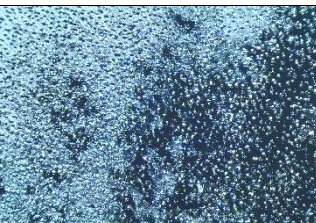
















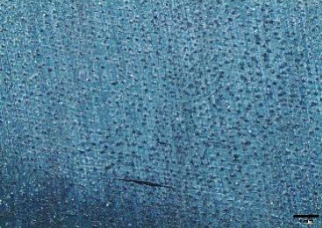


Fonte: autor.

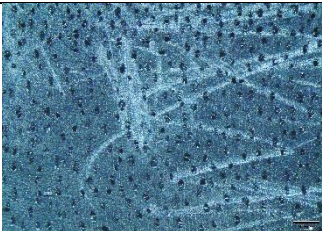
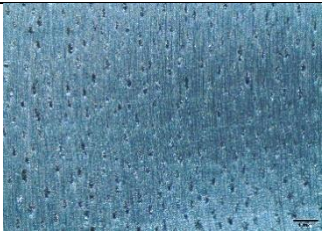

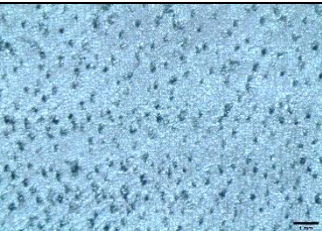
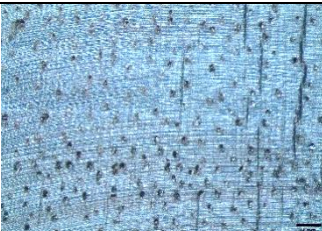
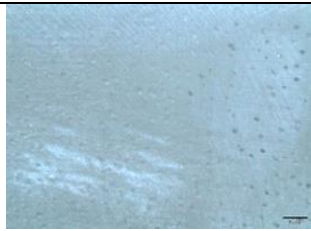
Tabela 13 - Imagens e condição do plano anatômico transversal das espécies carbonizadas em 300°C (escala 1mm).

Espécie	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Condição
Araucária				Sem avarias

Cedrinho				Rompimento em três amostras.
Cumaru				Rompimento em três amostras.
Cupiúba				Rompimento em três amostras. Fissura em uma amostra.
Eucalipto				Rompimento em três amostras.




Garapeira				Fissuras em duas amostras.
Guapuruvu				Sem avarias
Ipê				Fissuras em uma amostra.
Mandioqueira				Rompimento em uma amostra.

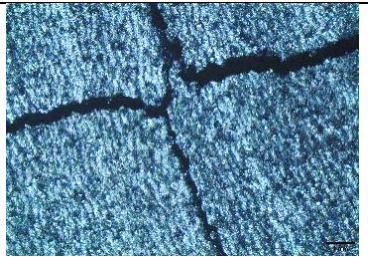


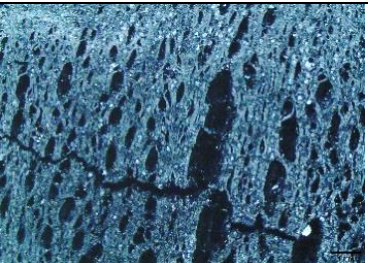
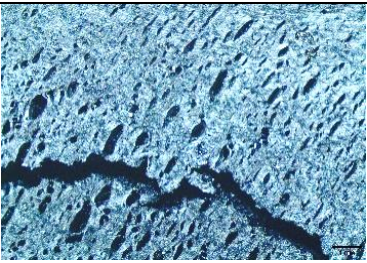

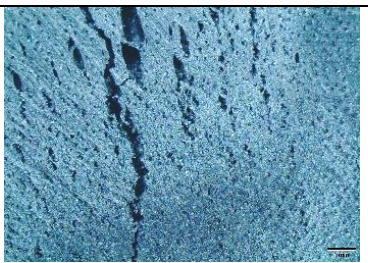
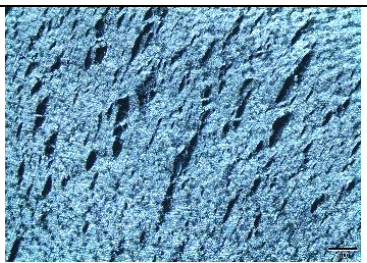




Muiracatiara				Rompimento em uma amostra. Fissuras em uma amostra.
Peroba				Fissuras em duas amostras.
Pinus				Sem avarias.
Roxinho				Rompimento em duas amostras.




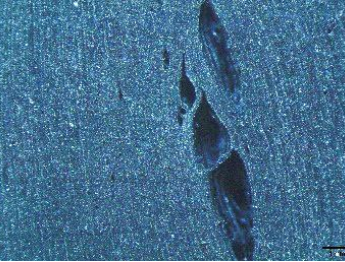
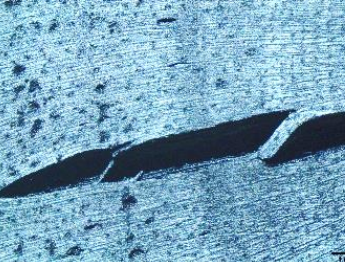
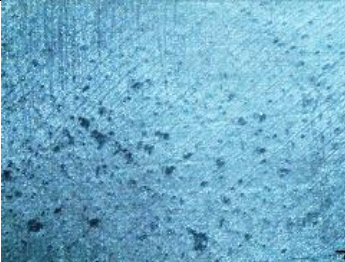



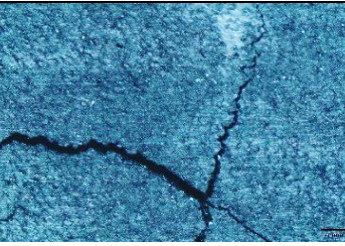
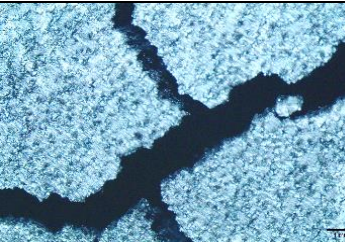
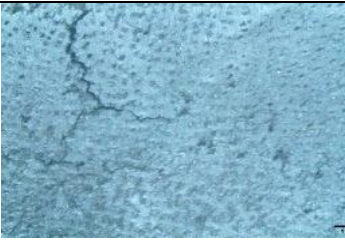
Seringueira				Sem avarias.
Tauari				Rompimento em duas amostras. Fissuras em uma amostra.











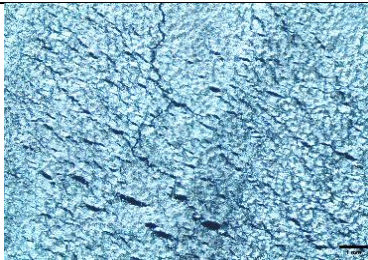

Fonte: autor.



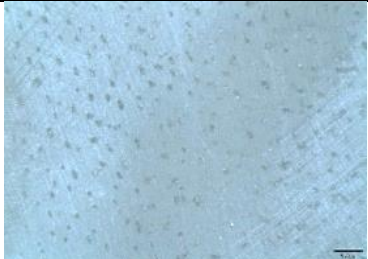
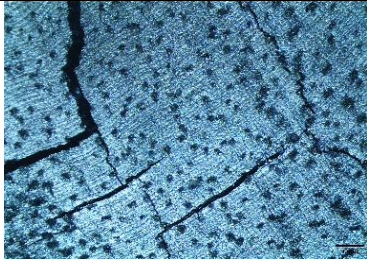
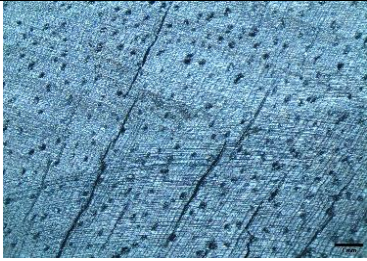
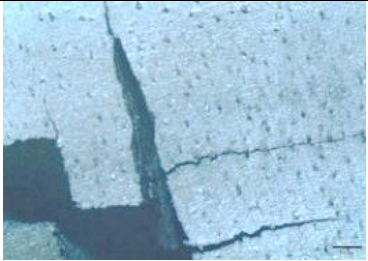
Tabela 14 - Imagens e condição do plano anatômico transversal das espécies carbonizadas em 400°C (escala 1mm).

Espécie	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Condição
Araucária				Rompimento em três amostras.

Cedrinho				Fissuras em três amostras.
Cumarú				Fissuras em duas amostras. Rompimento em três amostras.
Cupiúba				Fissuras em uma amostra. Rompimento em três amostras.
Eucalipto				Fissuras em duas amostras

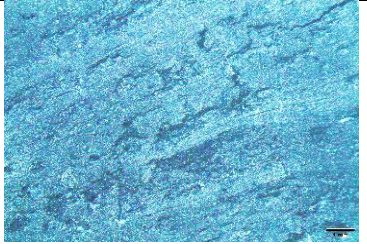

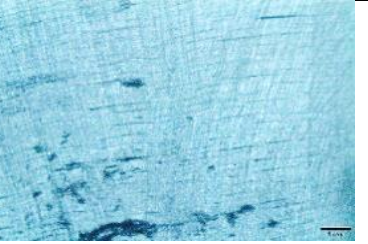
Garapeira				Fissuras em duas amostras.
Guapuruvu				Rompimento em três amostras.
Ipê				Fissuras em três amostras.
Mandioqueira				Fissuras em três amostras.


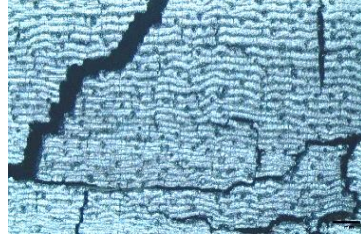

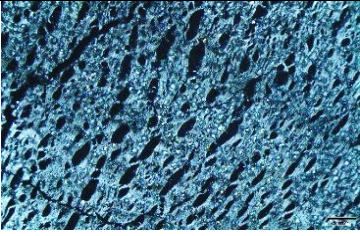
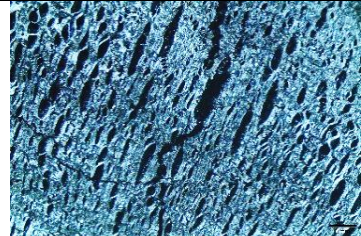

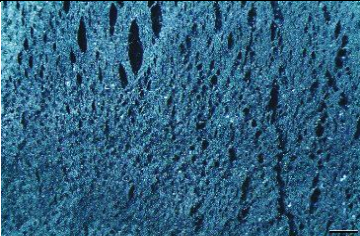


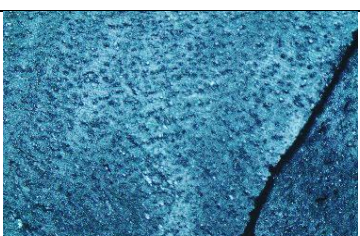

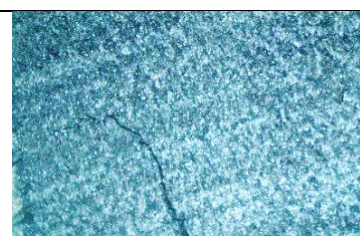
Muiracatiara				Rompimento em três amostras.
Peroba				Rompimento em duas amostras. Fissuras em três amostras.
Pinus				Fissuras em duas amostras.
Roxinho				Rompimento em três amostras.


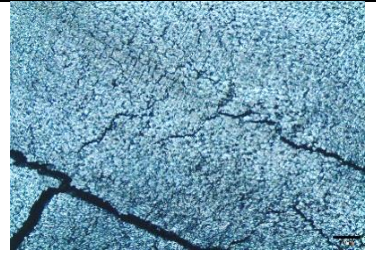

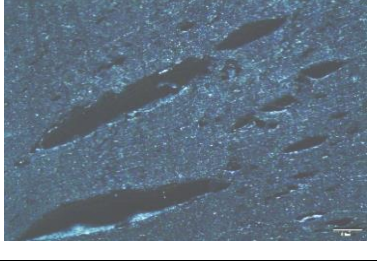
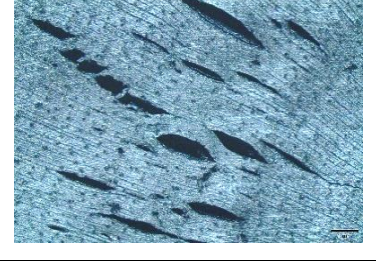







Seringueira				Fissuras em duas amostras.
Tauari				Fissuras em três amostras.

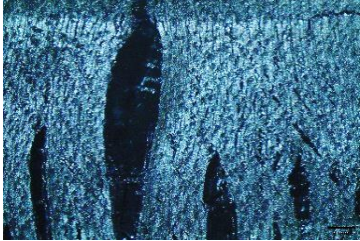
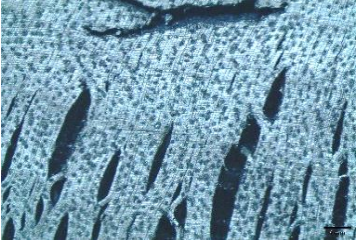
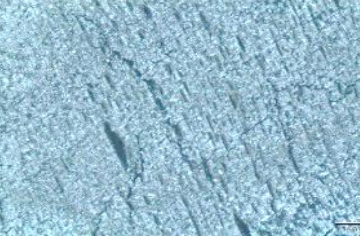









Fonte: autor.





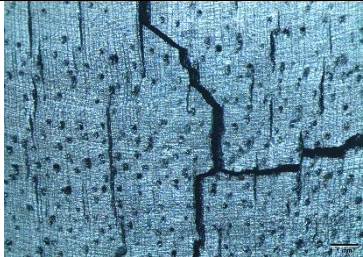

Tabela 15 - Imagens e condição do plano anatômico transversal das espécies carbonizadas em 500°C (escala 1mm).

Espécie	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Condição
Araucária				Fissuras em três amostras.

Cedrinho				Fissuras em duas amostras.
Cumaru				Rompimento em três amostras. Fissuras em duas amostras.
Cupiúba				Rompimento em três amostras. Fissuras em duas amostras.
Eucalipto				Rompimento em uma amostra. Fissuras em três amostras.




Garapeira				Fissuras em três amostras.
Guapuruvu				Rompimento em duas amostras.
Ipê				Fissuras em três amostras.
Mandioqueira				Fissuras em três amostras.


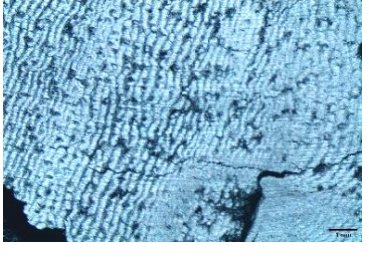
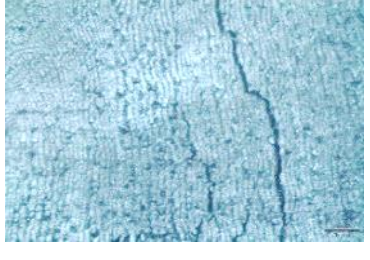
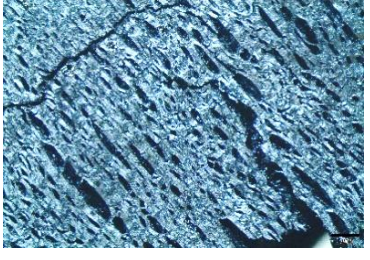
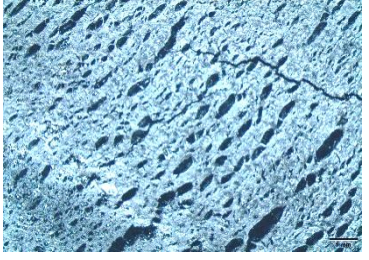




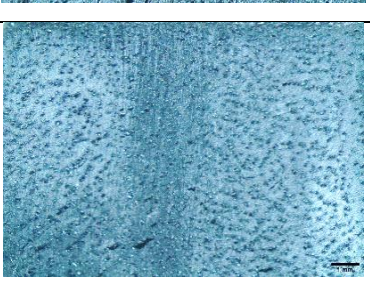
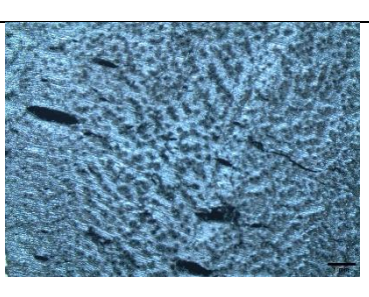
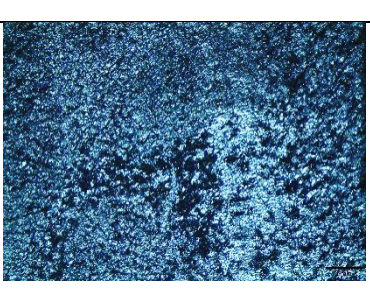
Muiracatiara				Rompimento em três amostras.
Peroba Rosa				Rompimento em duas amostras. Fissuras em três amostras.
Pinus				Fissuras em três amostras.
Roxinho				Fissuras e Rompimento em três amostras.


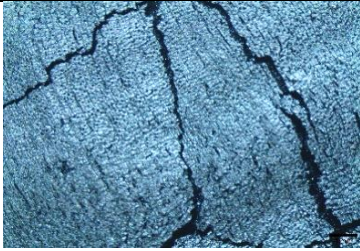


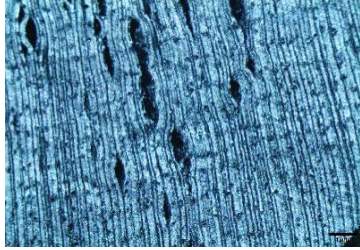

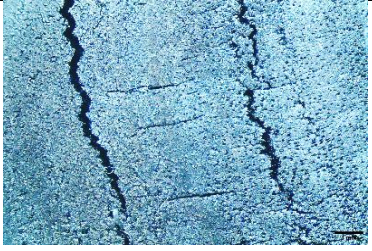

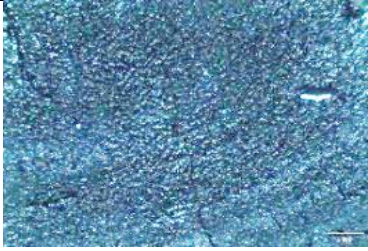
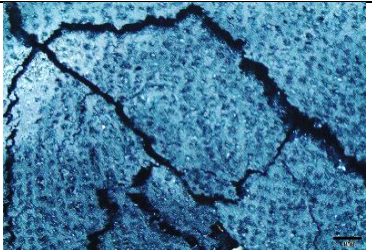
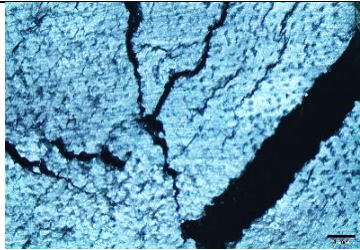
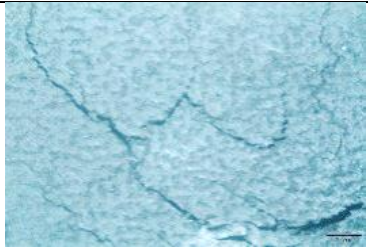
Seringueira				Fissuras em três amostras.
Tauari				Rompimento em duas amostras e diminuição em uma amostra.


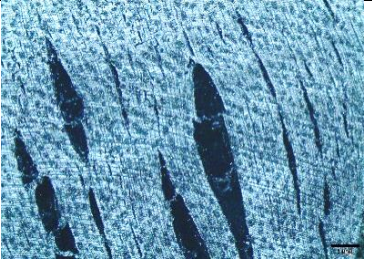

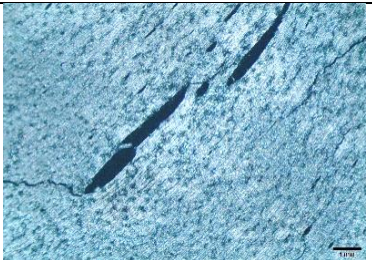
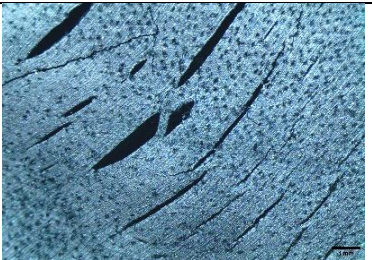

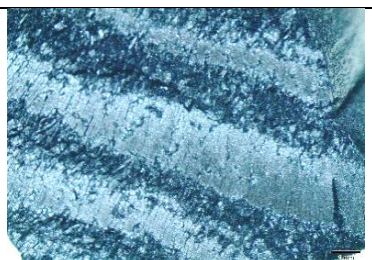

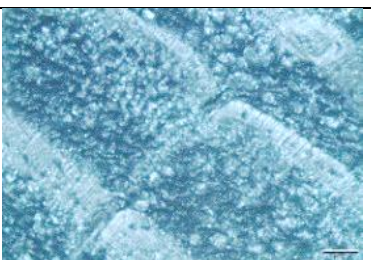
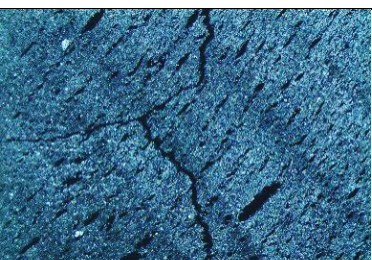
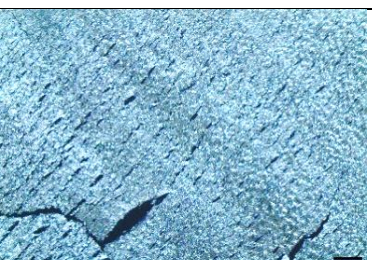

Fonte: autor.

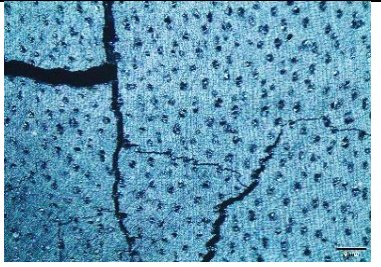
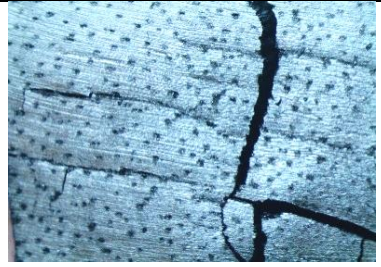


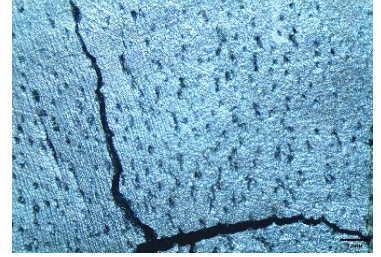

Tabela 16 - Imagens e condição do plano anatômico transversal das espécies carbonizadas em 600°C (escala 1mm).

Espécie	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Condição
Araucária				Fissuras em duas amostras.

Cedrinho				Fissuras em uma amostra. Rompimento em três amostras.
Cumaru				Rompimento em três amostras. Fissura em duas amostras.
Cupiúba				Rompimento em três amostras.
Eucalipto				Rompimento em três amostras.

Garapeira				Fissuras e Rupturas em três amostras.
Guapuruvu				Rompimento em uma das amostras
Ipê				Fissuras acentuadas em duas amostras.
Mandioqueira				Rompimento em duas amostras. Fissuras em três amostras.

Muiracatiara				Rompimentos em três amostras.
Peroba Rosa				Fissuras e Rompimento em três amostras
Pinus				Encolhimento em uma amostra
Roxinho				Rompimento em duas amostras e fissura em três amostras.

Seringueira				Rompimento em três amostras. Fissuras em duas amostras.
Tauari				Fissura e Rompimento em três amostras.

Fonte: autor.

Na temperatura de 300 °C, espécies com a densidade básica mais leves como a Araucária, o Guapuruvu o Pinus e a Seringueira não tiveram avarias.

As espécies que tiveram danos nas amostras quando carbonizadas, foram o Cedrinho, o Cumaru e o Eucalipto, isto é, apresentaram rompimento nas três amostras. O Roxinho e a Mandioqueira tiveram Rompimento em duas amostras.

Quanto a fissura, a Garapeira e a Peroba tiveram essa em duas amostras. E o Ipê teve fissuras em uma amostra apenas.

As espécies que tiveram os dois tipos de danos quando carbonizadas foram a Cupiúba: Rompimento em três amostras e Fissura em uma amostra, a Mandioqueira: Rompimento em uma amostra, a Muiracatiara: Rompimento em uma amostra. Fissuras em uma amostra. E o Tauari: Rompimento em duas amostras. Fissuras em uma amostra.

Na temperatura de 400 °C todas as espécies tiveram um tipo de dano. As fissuras foram em 11 espécies e os rompimentos foram em 7 espécies. Espécies como o Pinus, a Seringueira, o Eucalipto e a Garapeira tiveram fissuras em duas amostras. O Ipê, a Mandioqueira, Cedrinho e o Tauari tiveram fissuras em três amostras.

A Araucária, a Muiracatiara, o Guapuruvu e o Roxinho foram as espécies com os rompimentos nas três amostras. Enquanto, os dois danos que são a fissura e o rompimento estiveram presente em espécies como a Cupiúba: Rompimento em três amostras. Fissuras em uma amostra, o Cumaru: Rompimento em três amostras. Fissuras em duas amostras e a Peroba Rosa: Rompimento em duas amostras. Fissuras em três amostras.

Na temperatura de 500 °C as ocorrências de danos foram as fissuras em 12 espécies como Araucária, Cedrinho, Garapeira, Ipê, Mandioqueira, Pinus Seringueira, Rompimento 8 espécies: Guapuruvu, Muiracatiara, Eucalipto, Peroba Rosa, Cumaru, Cupiúba, Roxinho e Tauari. As espécies: Eucalipto, Peroba Rosa, cumaru, Cupiúba e Roxinho tiveram rompimentos e fissuras nas amostras estudadas. O Tauari apresentou diminuição em uma amostra após a carbonização.

Na temperatura de 600 °C os danos que romperam estiveram presentes em 10 espécies, como o Cedrinho, o Cumaru, a Seringueira, a Mandioqueira, o Roxinho e o Tauari, além da Peroba Rosa. As fissuras em 9 espécies como o Cedrinho cumaru,

Seringueira, Mandioqueira, Roxinho e o Tauari, além do Ipê e a Garapeira. A Garapeira e Peroba Rosa tiveram rupturas em suas amostras O Pinus teve encolhimento em uma amostra.

Os anéis de crescimento continuaram visíveis após a queima da madeira como no caso do *Pinus elliottii*.

Para a avaliação das propriedades da madeira como descrito por Moura-Pinto (2005), foi possível a mesma observação, tendo as características por correlações no momento da degradação da madeira por efeitos dos processos térmicos, ocasionados ao elevar a temperatura e a transformação em carvão acima de 300 °C.

4.5 Análise Estatística

4.5.1 Coeficientes de Variação das Temperaturas

Nas Tabelas de 17 até 21 são apresentados os coeficientes de variação (CV - %) para as propriedades investigadas considerando-se as quinze espécies de madeira avaliadas. As propriedades do carbono fixo e do poder calorífico não foram realizadas por serem calculados a partir dos resultados do teor de umidade, matérias voláteis e cinzas.

Tabela 17 - Coeficiente de variação (%) da perda de massa das espécies carbonizadas em diferentes temperaturas.

	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Cumaru	31,34	5,73	1,21	7,60
Ipê	31,02	5,10	1,54	7,79
Roxinho	44,23	3,22	2,50	9,73
Tauari	37,30	11,59	5,75	7,05
Garapeira	7,58	4,07	4,93	7,23
Cupiúba	48,76	4,99	1,38	9,31
Muiracatiara	44,36	8,10	4,78	9,93
Peroba Rosa	30,48	1,96	5,58	5,81
Mandioqueira	41,05	4,48	3,85	6,51
Seringueira	13,83	3,67	5,23	12,75
Eucalipto	47,22	10,23	7,05	12,30
Cedrinho	24,66	1,03	0,77	11,04
Pinus	34,65	8,79	26,38	34,18
Araucária	24,96	9,96	10,37	16,15
Guapuruvu	63,38	2,00	4,136	8,964

Tabela 18 - Coeficiente de variação (%) da densidade básica aparente das espécies antes de serem carbonizadas nas diferentes temperaturas.

	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Cumarú	2,30	3,01	1,79	3,37
Ipê	1,27	3,04	0,66	4,02
Roxinho	18,12	0,77	0,78	2,67
Tauari	0,81	11,10	3,64	2,95
Garapeira	3,47	3,54	3,20	8,53
Cupiúba	0,90	1,42	1,88	2,08
Muiracatiara	1,39	2,77	1,41	5,02
Peroba Rosa	24,47	1,52	0,38	1,79
Mandioqueira	1,89	2,42	3,30	1,23
Seringueira	4,64	0,62	3,63	5,81
Eucalipto	34,41	9,91	4,81	7,25
Cedrinho	1,38	0,36	2,91	4,26
Pinus	1,10	0,94	16,86	29,62
Araucária	14,59	8,14	13,57	13,05
Guapuruvu	41,63	4,79	1,80	6,10

Tabela 19 - Coeficiente de Variação (%) da densidade aparente das espécies após a carbonização nas diferentes temperaturas.

	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Cumarú	28,86	0,83	5,04	4,19
Ipê	13,45	6,13	6,17	15,04
Roxinho	26,27	4,76	5,72	6,91
Tauari	14,78	7,67	4,26	3,29
Garapeira	4,76	4,53	1,36	10,35
Cupiúba	21,67	5,28	30,12	1,75
Muiracatiara	21,76	17,10	16,60	9,43
Peroba Rosa	16,88	3,53	10,38	4,83
Mandioqueira	7,06	5,60	5,57	12,85
Seringueira	6,85	14,77	9,30	12,98
Eucalipto	5,32	9,04	1,62	3,46
Cedrinho	11,92	3,58	9,78	9,19
Pinus	15,66	3,12	20,76	26,03
Araucária	17,85	8,00	15,90	8,54
Guapuruvu	11,71	6,24	3,51	3,70

Tabela 20 - Coeficiente de Variação (%) do Teor de Umidade das espécies para Análise Imediata nas diferentes temperaturas de carbonização.

	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Cumaru	24,54	5,21	10,63	15,81
Ipê	38,14	2,99	15,91	14,01
Roxinho	23,70	5,00	18,56	15,03
Tuari	8,59	7,11	8,78	9,85
Garapeira	21,94	5,95	15,80	17,66
Cupiúba	28,10	5,48	12,09	15,50
Muiracatiara	18,54	23,19	9,91	16,95
Peroba Rosa	25,85	3,83	25,70	23,34
Mandioqueira	10,41	6,74	10,70	11,90
Seringueira	14,13	4,78	5,09	12,82
Eucalipto	15,99	4,19	16,58	10,26
Cedrinho	13,96	1,76	17,21	15,83
Pinus	10,86	0,75	17,15	13,06
Araucária	13,40	4,29	16,01	14,60
Guapuruvu	6,72	3,97	21,48	11,92

Tabela 21 - Coeficiente de Variação (%) do Teor de Materiais Voláteis na Análise Imediata das espécies nas diferentes temperaturas de carbonização.

	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Cumaru	3,82	3,00	10,23	3,66
Ipê	2,76	7,90	10,28	9,69
Roxinho	3,95	4,12	9,43	3,16
Tuari	1,18	4,21	14,60	20,15
Garapeira	1,63	3,52	10,43	10,89
Cupiúba	8,98	6,63	4,90	8,34
Muiracatiara	6,07	4,15	6,69	14,64
Peroba Rosa	4,72	5,12	14,43	20,32
Mandioqueira	2,07	5,98	5,99	13,20
Seringueira	0,56	3,30	8,51	4,03
Eucalipto	0,75	5,27	8,53	14,65
Cedrinho	4,71	2,83	3,31	8,58
Pinus	5,75	2,69	13,18	15,45
Araucária	0,61	7,35	52,34	10,52
Guapuruvu	3,31	6,76	7,430	14,22

Tabela 22 - Coeficiente de Variação (%) do Teor de Cinzas na Análise Imediata das espécies nas diferentes temperaturas de carbonização.

	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Cumaru	67,50	91,62	120,79	64,56
Ipê	50,32	21,85	5,73	32,72
Roxinho	2,63	90,01	81,99	5,44
Tauari	34,34	23,59	2,70	18,82
Garapeira	29,45	6,32	23,97	15,95
Cupiúba	32,54	60,96	1,80	5,55
Muiracatiara	9,85	39,00	38,12	16,21
Peroba Rosa	39,12	18,13	20,40	21,37
Mandioqueira	52,73	19,55	2,79	9,01
Seringueira	25,17	15,56	48,65	6,030
Eucalipto	15,84	114,56	27,53	21,72
Cedrinho	78,78	13,33	29,35	3,22
Pinus	57,44	17,13	139,30	40,51
Araucária	65,78	39,36	83,83	26,06
Guapuruvu	6,26	25,63	23,46	11,33

Na Estatística descritiva em temperatura de 300°, 400 °C, 500 °C e 600 °C com a Correlação nas seguintes propriedades estudadas neste trabalho sendo: Perda de massa (P.M.); Diferença de dimensão em A (D.D. A); Diferença de dimensão em B (D.D. B); Diferença de dimensão em C (D.D. C); Densidade Aparente (Dens A.); Densidade aparente das amostras Carbonizada (Dens Car.); teor de Materiais Voláteis (MV); Teor de Cinzas (%Cinzas). Os resultados são mostrados nas Tabelas 23 a 26 para cada temperatura estudada do teste de correlação com o Valor -p (5% de significância). O destaque em verde indica que está abaixo de 5%.

4.5.2 Estatísticas: Temperatura em 300° - Correlação

Tabela 23 - Correlação em temperatura de 300 °C.

	<i>P.M.</i>	<i>D.D. A</i>	<i>D.D. B</i>	<i>D.D. C</i>	<i>Dens A.</i>	<i>Dens. Car</i>	<i>%U</i>	<i>% MV</i>
<i>D.D. A</i>	0,347							
	0,019							
<i>D.D. B</i>	0,323	0,585						
	0,030	0,000						
<i>D.D. C</i>	0,499	0,466	0,400					
	0,000	0,001	0,006					
<i>Dens A.</i>	0,671	-0,036	-0,002	-0,121				
	0,000	0,813	0,989	0,428				
<i>Dens. Car</i>	0,139	-0,058	0,079	-0,370	0,739			
	0,362	0,706	0,607	0,012	0,000			
<i>%U</i>	-0,473	0,013	-0,063	-0,127	-0,525	-0,411		
	0,001	0,935	0,680	0,406	0,000	0,005		
<i>% MV</i>	-0,140	0,028	0,211	0,079	-0,335	-0,297	0,189	
	0,358	0,854	0,164	0,604	0,024	0,048	0,213	
<i>%Cinzas</i>	-0,023	0,249	0,018	0,194	-0,235	-0,192	-0,070	-
								0,234
	0,880	0,099	0,904	0,201	0,120	0,206	0,648	0,123

Conteúdo da Célula: Correlação de *Pearson* e Valor-p.

Na temperatura de 300 °C a variação de dimensões e perda de massa tem correlação significativa, pois os valores estão abaixo de 5% (D.D. A - 0,019; D.D. B - 0,030; D.D. C - 0,000).

Densidade Antes de carbonizar com a Perda de Massa tem correlação significativa (0,000), enquanto a Densidade do Carvão com a Perda de Massa não tem correlação (0,362).

Na Análise Imediata com a Perda de Massa, uma variável tem correlação (%U - 0,001), e duas variáveis (Materiais Voláteis - 0,358 e % Cinzas - 0,880) não tem correlação.

A densidade antes de carbonizar não tem correlação significativa com a variação de Dimensão A (D.D. A - 0,813) e Dimensão B (D.D. B - 0,989) e Dimensão C (D.D. C - 0,428)

A densidade de carvão tem correlação com a variação de Dimensão C (D.D. C - 0,012) e com a densidade antes de carbonizar (Dens A. - 0,000). Porém não tem

correlação significativa com a variação de Dimensão A (D.D. A - 0,706) e de Dimensão B (D.D. B - 0,607).

O teor de umidade tem correlação significativa com a densidade antes de carbonizar e do carvão (Dens A. - 0,000 e Dens Car - 0,005). O teor de materiais voláteis também tem correlação significativa com a densidade antes de carbonizar e do carvão (Dens A. - 0,024 e Dens Car - 0,048). Porém o Teor de cinzas não tem correlação significativa com a densidade antes de carbonizar e do carvão (Dens A. - 0,120 e Dens Car - 0,206).

4.5.3 Estatísticas: Temperatura em 400° - Correlação

Tabela 24 - Correlação em temperatura de 400 °C.

	<i>P.M.</i>	<i>D.D. A</i>	<i>D.D. B</i>	<i>D.D. C</i>	<i>Dens A.</i>	<i>Dens. Car</i>	<i>%U</i>	<i>% MV</i>
<i>D.D. A</i>	0,319 0,002							
<i>D.D. B</i>	0,309 0,003	0,675 0,000						
<i>D.D. C</i>	0,423 0,000	0,170 0,111	0,024 0,825					
<i>Dens A.</i>	0,755 0,000	0,046 0,667	0,069 0,520	-0,036 0,739				
<i>Dens. Car</i>	0,303 0,004	0,137 0,199	0,203 0,056	-0,284 0,007	0,750 0,000			
<i>%U</i>	-0,121 0,258	0,104 0,331	0,010 0,922	0,327 0,002	-0,419 0,000	-0,476 0,000		
<i>% MV</i>	-0,389 0,000	-0,232 0,028	-0,109 0,310	-0,524 0,000	-0,103 0,337	0,124 0,249	-0,403 0,000	
<i>%Cinzas</i>	0,030 0,778	0,173 0,105	0,076 0,481	0,138 0,197	-0,158 0,139	-0,162 0,130	0,139 0,194	-0,326 0,002

Conteúdo da Célula: Correlação de *Pearson* e Valor-p.

Na temperatura de 400 °C a variação de dimensões e perda de massa tem correlação significativa pois os valores estão abaixo de 5% (D.D. A - 0,002; D.D. B - 0,003; D.D. C - 0,000).

A Densidade Antes de carbonizar com a Perda de Massa tem correlação significativa (0,000). Da mesma forma a Densidade do Carvão com a Perda de Massa tem correlação (0,004).

Na Análise Imediata com a Perda de Massa, uma variável tem correlação (Materiais Voláteis - 0,000), e duas variáveis (%U - 0,258 e %Cinzas - 0,778) não tem correlação.

A densidade antes de carbonizar não tem correlação significativa com a variação de Dimensão A (D.D. A - 0,667) e Dimensão B (D.D. B - 0,520) e Dimensão C (D.D. C - 0,739)

A densidade de carvão tem correlação com a variação de Dimensão C (D.D. C - 0,007) e com a densidade antes de carbonizar (Dens A- 0,000). Porém não tem correlação significativa com a variação de Dimensão A (D.D. A - 0,199) e de Dimensão B (D.D. B - 0,056).

O teor de umidade tem correlação significativa com a variação de dimensão C (D.D. C - 0,002), com a densidade antes de carbonizar e do carvão (Dens A. - 0,000 e Dens Car - 0,000). O teor de materiais voláteis não tem correlação significativa com a densidade antes de carbonizar e do carvão (Dens A. - 0,337 e Dens Car - 0,249). O Teor de cinzas tem correlação significativa somente com o teor de materiais voláteis (M.V. - 0,002).

4.5.4 Estatísticas: Temperatura em 500° - Correlação

Tabela 25 - Correlação em temperatura de 500 °C.

	<i>P.M.</i>	<i>D.D. A</i>	<i>D.D. B</i>	<i>D.D. C</i>	<i>Dens A.</i>	<i>Dens. Car</i>	<i>%U</i>	<i>% MV</i>
<i>D.D. A</i>	0,106							
	0,489							
<i>D.D. B</i>	0,144	0,646						
	0,347	0,000						
<i>D.D. C</i>	-0,457	-0,064	0,187					
	0,002	0,678	0,219					
<i>Dens A.</i>	0,958	-0,038	-0,007	-0,490				
	0,000	0,806	0,964	0,001				
<i>Dens. Car</i>	0,891	0,390	0,406	-0,456	0,858			
	0,000	0,008	0,006	0,002	0,000			
<i>%U</i>	-0,076	-0,158	-0,305	-0,059	-0,046	-0,110		
	0,619	0,300	0,041	0,698	0,766	0,474		
<i>% MV</i>	-0,157	-0,149	0,001	0,131	-0,152	-0,171	-0,177	
	0,304	0,329	0,997	0,390	0,320	0,260	0,245	
<i>%Cinzas</i>	-0,125	0,326	0,271	-0,011	-0,208	-0,045	0,040	-0,209
	0,414	0,029	0,072	0,942	0,170	0,769	0,794	0,167

Conteúdo da Célula: Correlação de *Pearson* e Valor-p.

Na temperatura de 500 °C a variação de dimensões e perda de massa não tem correlação significativa em duas propriedades (*D.D. A* - 0,489 e *D.D. B* - 0,347). Somente na variação de dimensão C tem correlação significativa (*D.D. C* - 0,002).

A Densidade Antes de carbonizar com a Perda de Massa tem correlação significativa (0,000). Da mesma forma a Densidade do Carvão com a Perda de Massa tem correlação (0,000).

Na Análise Imediata com a Perda de Massa, as três variáveis não têm correlação (*%U* - 0,619; *M.V.* - 0,314 e *%Cinzas* - 0,414).

A densidade antes de carbonizar tem correlação significativa com a variação de Dimensão C (*D.D. C* - 0,001). No entanto, não tem correlação significativa com a Dimensão A (*D.D. A* - 0,806) e a Dimensão B (*D.D. B* - 0,964).

A densidade de carvão tem correlação com a variações de dimensões A (*D.D. A* - 0,008), dimensão B (*D.D. B* - 0,006) e dimensão C (*D.D. C* - 0,002). Da mesma forma há correlação significativa com a densidade antes de carbonizar (*Dens A* - 0,000).

O teor de umidade tem correlação significativa com a variação de dimensão B (D.D. B - 0,041). O teor de materiais voláteis não tem correlação significativa com as propriedades estudadas na temperatura de 500 °C. O Teor de cinzas tem correlação significativa com a variações de dimensões A (D.D. A - 0,029), dimensão B (D.D. B - 0,072).

4.5.5 Estatísticas: Temperatura em 600° - Correlação

Tabela 26 - Correlação em temperatura de 600 °C.

	<i>P.M.</i>	<i>D.D. A</i>	<i>D.D. B</i>	<i>D.D. C</i>	<i>Dens A.</i>	<i>Dens. Car</i>	<i>%U</i>	<i>% MV</i>
<i>D.D. A</i>	0,181							
	0,234							
<i>D.D. B</i>	-0,088	0,142						
	0,564	0,353						
<i>D.D. C</i>	0,099	-0,032	-0,236					
	0,516	0,835	0,118					
<i>Dens A.</i>	0,931	0,040	-0,072	-0,141				
	0,000	0,796	0,640	0,355				
<i>Dens. Car</i>	0,864	0,220	0,309	-0,093	0,864			
	0,000	0,146	0,039	0,544	0,000			
<i>%U</i>	-0,664	-0,220	0,025	0,038	-0,620	-0,626		
	0,000	0,147	0,869	0,803	0,000	0,000		
<i>% MV</i>	-0,093	-0,286	-0,201	-0,131	0,046	-0,152	-0,012	
	0,545	0,057	0,185	0,390	0,766	0,318	0,937	
<i>%Cinzas</i>	-0,013	0,161	0,119	-0,193	-0,071	0,105	-0,028	-0,340
	0,931	0,290	0,436	0,205	0,643	0,492	0,857	0,022

Conteúdo da Célula: Correlação de *Pearson* e Valor-p.

Na temperatura de 600 °C a variação de dimensões e perda de massa não tem correlação significativa (D.D. A - 0,234 e D.D. B - 0,564 e D.D. C – 0,516).

A Densidade Antes de carbonizar com a Perda de Massa tem correlação significativa (0,000). A Densidade do Carvão com a Perda de Massa também tem correlação significativa (0,000).

Na Análise Imediata com a Perda de Massa, somente teor de umidade tem correlação significativa (%U - 0,000), as outras duas variáveis não têm correlação (M.V. - 0,545 e %Cinzas - 0,931).

A densidade antes de carbonizar não tem correlação significativa com a variação de Dimensão A (D.D. A - 0,796), Dimensão B (D.D. B - 0,640) e a Dimensão C (D.D. C - 0,355).

A densidade de carvão não tem correlação com a variações de dimensões A (D.D. A - 0,146), dimensão C (D.D. C - 0,544). Somente possui correlação significativa com a dimensão B (D.D. B - 0,039). Da mesma forma há correlação significativa com a densidade antes de carbonizar (Dens A- 0,000).

O teor de umidade tem correlação significativa com a densidade antes de carbonizar (Dens A. - 0,000) e densidade do carvão (Dens Car - 0,000). O teor de materiais voláteis não tem correlação significativa com as propriedades estudadas na temperatura de 600 °C. O Teor de cinzas tem correlação significativa com teor de materiais voláteis (0,022).

5 CONCLUSÕES

Como a finalização desta pesquisa, concluiu o seguinte:

- O estudo demonstrou que as espécies podem ter comportamentos distintos quando carbonizadas, como as perdas de massas diferentes, mesmo quando comparadas por gradiente decrescente de densidade básica, além da alteração não gradual das propriedades químicas como ocorrido com a análise imediata. As propriedades físicas como a alteração dimensional e a perda de massa das amostras, juntamente com sua degradação visual em aspectos qualitativos, ficaram evidentes na medida que houve o aumento de temperatura.
- O comportamento linear decrescente observado no gradiente da densidade básica não foi similar ao encontrado nas análises do poder calorífico, carbono fixo e perda de massa. Ainda que as temperaturas tivessem quatro escalas, o comportamento dessas propriedades se diferenciou entre as espécies para cada uma das carbonizações de 300 °C, 400 °C, 500 °C e 600 °C, de forma que a taxa de carbonização se mantivesse em média de 20 °C / min.
- A perda de massa não foi influenciável majoritariamente na temperatura de 600 °C. Nesse caso, somente na densidade aparente, antes e depois de carbonizadas as amostras, o teor de umidade teve relação com essa redução mássica. No entanto, na temperatura de 400 °C, o teor de cinzas não foi influenciado pela perda de massa, ao contrário das demais propriedades.
- As análises imediatas não tiveram relação na densidade aparente nas condições de pré e pós carbonização. Somente o teor de umidade possuiu relação nas temperaturas de 300 °C, 400 °C e 600 °C no momento antes da queima. Após carbonizadas no ensaio da análise imediata, se observou uma relação apenas no teor de umidade nas temperaturas de 300 °C, 400 °C e 600 °C. Há evidência estatística que, na temperatura de 500 °C, a carbonização não sofreu influência pela propriedade da densidade aparente, como era esperado.
- Apenas as propriedades visuais como surgimento de fissuras e rompimento das amostras foram detectadas a partir do aumento das temperaturas de carbonização.
- Diante do estudo realizado não é possível afirmar que a alteração de altas temperaturas na carbonização prevaleceu relação do gradiente da densidade básica nas espécies com a mudança das propriedades como perda de massa,

análise imediata, mudança dimensional. Cabe salientar que a possibilidade de agrupamento das espécies com determinadas densidades poderia facilitar a identificação das propriedades estudadas.

- Das espécies estudadas, aquelas de menor densidade básica, como: Guapuruvu, Araucária, Pinus e Cedrinho não tiveram avarias ou danos visíveis por meio da análise da degradação visual na temperatura de 300 °C. Para temperaturas acima desta (400 °C, 500 °C e 600 °C) ocorreram danos em todas as espécies.
- Não foi comprovado que a densidade básica estabeleceu os efeitos diretos na degradação sobre as espécies de madeira estudadas, por outro lado, houve influência da temperatura aplicada.
- As imagens produzidas podem colaborar no entendimento do carvão enquanto material em suas diversas passagens de temperaturas e processos térmicos, além da análise da anatomia das amostras carbonizadas, sendo adotado como parâmetros, os termos: rompimentos e fissuras como danos da madeira carbonizada.
- O estudo ainda apontou que nem sempre a densidade básica pode ser o fator determinante na qualidade do carvão, pois espécies mais densas não tem o comportamento gradual em se tratando na elevação de carbono fixo e poder calorífico.
- A carbonização em altas temperaturas não tem correlação em propriedades como densidade e alteração das dimensões da madeira. A perda de massa e as mudanças dimensionais, em conjunto com a análise visual da presença de fissuras e rompimentos da madeira, pode representar importante característica para o estudo do carvão e o comprometimento da sua qualidade. O poder calorífico é uma propriedade importante na definição da qualidade, porém espécies mais densas em que há maior poder calorífico, demonstrou maiores danos em sua estrutura, conseqüentemente maior friabilidade, uma vez que o carvão mais quebradiço não é desejável para determinadas situações de produto. Neste caso, as fissuras e o rompimento nas amostras são evidências que podem caracterizar maior friabilidade e, portanto, reduzir o potencial de uso do carvão.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. M.; CARVALHO, L. M.; Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado Do Rio de Janeiro. **Floram**, v. 5 p. 24-42, 1998.
- ANDRADE, B. G.; VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C.; BASSO, V. M.; PINTO, F. A. C.; Potential of Texture Analysis for Charcoal Classification. **Floresta e Ambiente**. v. 26, n 3. 10 p. 2019.
- ANDRADE, F. W. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; MOUTINHO, V. H. P.; Influence of Wood Physical Properties on Charcoal from *Eucalyptus* spp. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, p. 1-8, 2018.
- ANDRADE, J. C.; VAREJÃO, M. J. C.; NASCIMENTO, C. S.; Determinação macroscópica de inclusões minerais sílica em seis espécies florestais. In: II Congresso de Iniciação Científica PIBIC/CNPq - PAIC/FAPEAM. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas. **Anais...** Manaus: 2013.
- ANEEL; **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2008.
- ANTAL JR., M.J.; MOK, W.S.L.; VARHEGYI, G.; SZEKELY, T. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass. **Energy & Fuels**, v. 4, n. 3, p. 221-225, 1990.
- ARANTES, M. D. C. A.; TRUGILHO, P. F.; DA SILVA, J. R. M.; ANDRADE, C. R.; Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, 2013.
- ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; SILVA, J. R. M.; LIMA, J. T.; Sistema alternativo para carbonização de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 78, p. 133-140, 2008.
- ASTM - American Society for Testing Materials. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. E 119-00a. In: **Annual Book of ASTM Standards**. 2000.
- AZEVEDO, C. H. S.; SANTOS, F. G.; ANDRADE, L. V. O.; SILVA, A. G.; SANTOS, F. E. V.; Influência da Temperatura Final de Carbonização e da taxa de aquecimento do rendimento gravimétrico e teor de cinzas do carvão de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Centro Científico Conhecer**: Goiânia, v.9, N.16; p. 1279-1287. 2013.
- ATHANÁZIO-HELIODORO, J. C.; **Qualidade da madeira de árvores de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake) com 15 anos provenientes de área de recuperação florestal**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Faculdade de Ciências Agrônômica - Universidade Estadual Paulista. Botucatu.

ATHANÁZIO-HELIODORO, PACHECO L.; GAIAD, N.; LARA-PALMA, H. A.; BALLARIN, A. W.; Properties of Young Guapuruvu (*Schizolobium parahyba*) Wood from a Forest Recovery Area. **Floresta Ambiente**. Seropédica, v. 25, n. 3, 2018.10 p.

BARREIROS, R. M.; VASCONCELOS, J. S.; PAES, G. R.; Comparative macroscopic anatomy of wood and after carbonization in several temperatures of four commercial species for identification purposes. In: Biomass and Bionergy Conference - BBC Brazil, 2018, Sorocaba-SP. **Anais...** Sorocaba: 2018. p. 1-10.

BEZERRA, R. M. R.; PIMENTA, A. S.; SUMIDA, M. M. G.; DA NOBREGA, C. C.; CARVALHO, M. A. B.; DE ARAÚJO, L. H. B.; CÂMARA, W. D. F.; Rendimento do carvão vegetal de Mimosa tenuiflora em diferentes temperaturas de carbonização. In: VIII Simpósio Brasileiro de Pós-Graduação em Ciências Florestais. UFRPE. **Anais...** Recife. 2014. p. 78-82.

BRAGA JUNIOR, M. M.; SANTANA, D. S. S.; LIMA, M. F.; SOUZA, F. I. B.; MELO, L. E. L.; Effects of carbonization in the anatomical structure of Alexa grandiflora's Ducke wood. **Revista de Ciências Agrárias (Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Science)**. v. 62., p. 1-6, 2019.

BRASIL; Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**. DF. 2018.

BRASIL; Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC n. 298, de 10 de setembro de 2008. **Diário Oficial**, 11 set. 2008, p. 89.

BRITO, J. O.; NUCCI, O.; Estudo tecnológico da madeira de *Pinus* spp para a produção de carvão vegetal e briquetagem. **IPEF**, n. 26, p.25-30, 1984.

BURGUER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. Nobel, São Paulo, 1991.

CANAL, W.D.; CARVALHO, A.M.M.; FIGUEIRÓ, C.G.; CARNEIRO, A.C.O.; FIALHO, L.F.; DONATO, D.B. Impact of wood moisture in charcoal production and quality. **Floresta e Ambiente**, v.27, n.1, p.1-7, 2020.

CARNEIRO, A.C.O.; CASTRO, A.F.N.M.; CASTROM R.V.O.; SANTOS, R.C.; FERREIRA, L.P.; DAMÁSIO, R.A.P.; VITAL, B.R. Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. em função da idade e diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v.38, n.2, p.375-381, 2014.

CARVALHO, P. E. R.; Circular Técnica nº 96. Peroba-Rosa *Aspidosperma polyneuron*. **EMBRAPA**. 2004. 12 p.

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 vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.6, p.627-635, 2013.

CASTRO, A.F.N.M.; CASTRO, R.V.O.; CARNEIRO, A.C.O.; SANTOS, R.C.; CARVALHO, A.M.M.L.; TRUGILHO, P.F.;

MELO, I.C.N.A. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of eucalyptus clones. **Revista Árvore**, v.40, n.3, p.551-560, 2016.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P.; Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**. Centro Científico Conhecer, v.9, n.17, p. 533-542, 2013.

COELHO, R. T.; NETO, J. S.; Levantamento de propriedades físicas das espécies de madeira que geram maior volume de resíduos no pólo industrial do norte matogrossense. In: IV Congresso Interno de Iniciação Científica-CONIC/UNEMAT. Universidade do Estado de Mato Grosso. **Anais...** Cáceres: 2008.

COUTO, A. M.; **Influência das características anatômicas, químicas e físicas da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* na qualidade do carvão para uso siderúrgico**. 2019. Tese (Doutorado) em Ciência e Tecnologia da Madeira. Universidade de Lavras. Lavras.

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

CRISÓSTOMO, M. C.; SILVA, M. F.; VALE, A. T.; CHAVES, B. S.; **Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus sp.*, *T. vulgaris* e *P. lecointei***. In: OLIVEIRA, R. J.; org. Recursos naturais: energia de biomassa florestal. Científica Digital. 2021. p. 49-61.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. Escola de Engenharia de São Carlos. **Anais...** São Carlos: 1989.

DA SILVA, D.A., TRUGILHO, P.F.; Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se da metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas. **CERNE**, v.9, n.1, p.056-065, 2003.

DA SILVA, R. C.; MARCHESAN, R.; FONSECA, M. R.; DIAS, A. C. C.; VIANA, L. C.; Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-10, 2018.

DAMÁSIO, R. A. P.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARDOSO, M. T.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L. M.; Caracterização anatômica e qualidade do carvão vegetal da madeira de pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*). **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, n. 75, p 261-267, 2013.

DAMÁSIO, R. A. P.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; BARCELOS, D. C.; PEREIRA, B. L. C.; MAGALHÃES, M. A.; SILVA, M. S.; Perfil térmico e controle da

carbonização em forno circular por meio da temperatura interna. **Ciência da Madeira**, v. 6, n. 1, p 11-22, 2015.

DIAS JÚNIOR, A.; F.; COSTA JÚNIOR, D. S. C.; DE ANDRADE, A. M.; DE OLIVEIRA, E.; LANA, A. Q.; BRITO, J. O.; Quality of Eucalyptus Wood Grown in Rio de Janeiro State for Bioenergy. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n.3, 2016.

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

FAO; Industrial Charcoal Making. Forestry Department. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome: v. 63, 1985, p. 4.1-4.2. Disponível: <http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e00.htm>. Acesso em: 20 abr. 2021.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood. Chemistry. Ultrastructure. Reactions**. Walter de Gruyter. Berlin, 1989.

FIGUEIREDO, M. E. O.; LONGUE, D.; PEREIRA, A. K. S.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, C. M. S.; Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* Tul. (Madeira Nova) para produção de carvão vegetal. Nota Técnica. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, 17 p. 2018.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G.; Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, v. 2, n. 3, p. 65-74, 1971.

FRANÇA, F. F.; **Correlação estrutura/propriedades das madeiras termotratadas de *Pinus sp.* e *Eucalyptus spp.*** 2019. Tese (Doutorado) Setor de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. B. D.; Carvão Vegetal: Propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Tecnologia e Tendências**. v. 9, n, 1, 19 p., 2014.

FUJIHARA, M. A.; CAVALCANTI, R.; GUIMARÃES, A.; GARLIPP, R.; **O valor das florestas**. São Paulo: Terra das Artes Editora, 2009.

GARCIA, D.P.; RODRIGUES, C.R.; DAL BEM, E.A.; FERREIRA, J.P. Qualidade do carvão vegetal visando uso doméstico. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.11, n.1, p.59-67, 2017.

GONÇALVES, T. A. P.; **Anatomia do lenho e do carvão de espécies arbóreas do cerrado no Estado de São Paulo**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Faculdade de Ciências Agrônômica - Universidade Estadual Paulista. Botucatu.

GONÇALVES, T. A. P.; NISGOSKI, S.; OLIVEIRA, J.; MARCATI, C. R.; BALLARIN, A. W.; MUÑIZ G. I. B.; A contribution to the identification of charcoal origin in Brazil II

– Macroscopic characterization of Cerrado species. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 88. n. 2. p.1045-1054. 2016.

IGLESIAS, V.; YOSPIN G. I.; WHITLOK, C.; Reconstruction of fire regimes through integrated paleoecological proxy data and ecological modeling. **Fronteiras in Plant Science**, v. 5, n 756, 16 p. 2015.

JÚNIOR, M. M. B.; SANTANA, D. S. S.; R~EGO, G. L.; SOUZA, F. I. B.; Melo, L. E. L.; Effects of carbonization in the anatomical structure of Alexa grandiflora's Ducke wood. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, 2019. 6 p.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; **Química da madeira**. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Curitiba. 3 ed, 2005. 86 p.

LELES, P. S. S.; MACHADO, T. F. F.; ALONSO, J. M.; SILVA, L. L.; Crescimento e Biomassa de *Melia azedarach* L. em Diferentes Espaçamentos e Características Tecnológicas da Madeira Visando à Produção de Carvão. **Floresta e Ambiente**: v. 21, n. 2, 2014. p. 214-223.

LOUREIRO, B. A.; ASSIS, M. R.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. F. F.; TRUGILHO, P. F.; 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.

MACHADO, J. G. M. S.; **Estudo de reatividade e combustão de carvões minerais, carvão vegetal e misturas**. 2009. Tese (Doutorado) em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MACHADO, G. O.; VOGEL, f.; SILVA, M. M.; Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de Cinamomo (*Melia azedarach* L.). **Ambiência Guarapuava (PR)**, v.10, n.1, p. 83-96. 2014.

MARGUERIE, D.; HUNOT, J. Y. Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France. **Journal of Archaeological Science**, New York, v. 34, p. 1417-1433, 2007.

MARQUES, M. H. B.; MARTINS, V. A.; Secagem da madeira. Curso para capacitação de agentes multiplicadores em valorização da madeira e resíduos vegetais. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. Brasília: 2002.

MARTIN, C.; **Tropical Timber soft he World**. USDA Forest Service. Ag. Handbook No. 607. 1984. In: Technology Transfer Fact Sheet. Center for Wood Anatomy Research. Madison. Disponível: https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/TechSheets/Chudnoff/TropAmerican/html_files/courat1new.html. Acesso: 26 jan. 2019.

MARTINS, C. H.; O aproveitamento de madeiras das podas da arborização viária de Maringá/PR. **Revista Verde**. Mossoró, Rio Grande do Norte: v. 8, n. 2, p. 257-267, 2013.

MATTOS, P. P.; BORTOLI, C.; MARCHESAN, R.; ROSOT, N. C.; Caracterização Física, química e anatômica da madeira de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. Comunicado Técnico 160: **EMBRAPA**, 4 p, 2006.

MEDEIROS, L. C. D.; **Efeito da velocidade de carbonização na composição química do extrato pirolenhoso da madeira de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) e Jurema Preta (*Mimosa tenuiflora* (Wild.) Poir.)**. 2018. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Dissertação. Macaíba.

Melo, J. E.; Camargo, J. A. A.; **A madeira e seus usos**. Serviço Florestal Brasileiro. Laboratório Produtos Florestais. Ministério do Meio Ambiente. Brasília: 2016, 228 p.

MOURA, L. F.; BRITO, J. O.; Efeito da termorretificação sobre as propriedades colorimétricas das madeiras de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 069-076, 2011.

MOURA-PINTO; **Determinação de um modelo para taxa de carbonização transversal a grã para a madeira de *E. citriodora* e *E. grandis***. 2005. Tese (Doutorado) em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos.

MOUTINHO, V. H. P.; **Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. na qualidade do carvão**. 2013. Tese (Doutorado) em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais – Departamento de Ciências Florestais. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba.

MUÑIZ, G. I. B. NISGOSKI, S.; SHARDOSIN, F. Z.; FRANÇA, F. F.; Anatomia do carvão de espécies florestais. **CERNE**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 471-477, 2012.

NARITA, D.K.; NAKASHIMA, G.T.; RÓZ, A.L.; PIRES, A.A.F.; YAMAJI, F.M. Uso do guapuruvu (*Schizolobium parahyba*) para fins energéticos. **Ciência Florestal**, v.28, n.2, p.758-764, 2018.

NEVES, T.A.; PROTÁSIO, T.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**, v.31, n.68, p.319-330, 2011.

NISGOSKI, S; MUÑIZ, G. I. B.; FRANÇA, R. F.; BATISTA, F. R. R. Anatomia do lenho carbonizado de *Copaifera cf. langsdorfii* Desf. e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Wild. **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**. Pelotas: v. 03, n. 02, p. 66-79. 2012.

NISGOSKI, S; MAGALHÃES, W. L. E.; BATISTA, F. R. R.; FRANÇA, R. F.; MUÑIZ, G. I. B. Anatomical and energy characteristics of charcoal made from five species. **Acta Amazonica**. v. 44, n. 3, 367-372, 2014.

MEDEIROS, L. C. D.; **Efeito da velocidade de carbonização na composição química do extrato pirolenhoso da madeira de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) e Jurema Preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.)**. 2018. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Dissertação. Macaíba.

NUMAZAWA, S.; Características do carvão vegetal de cupiúba (*Goupia glabra*). Informe técnico nº15. Serviço de Documentação e Informação. Faculdade de Ciências Agrárias do Pará. Ministério da Educação. 1990.15 p.

OLIVEIRA JUNIOR, E. F.; **Determinação das propriedades físicas e químicas da madeira de *Hevea brasiliensis* em relação ao painel de extração de látex**. 2011. Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrônômicas. Dissertação. Botucatu, 2011. 64 p.

OLIVEIRA, A. F.; BAVARESCO, A.; PESSUTI, C. A. A.; MIYASHIRO, C. S.; FRANK, J.; Análise da Qualidade do Carvão para Consumo Doméstico de Quatro Municípios do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.4, p. 102-111, 2015.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; DAMASIO, R; A. P.; Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperatura e carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.557-566, 2013.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. 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**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, J. C.; CASTRO, E. G.; MIRANDA, C. S.; GONÇALVES, A. P. B.; JOSÉ, N. M.; Avaliação térmica e espectroscópica da celulose, hemicelulose e lignina extraídas da fibra de Licuri (*Syagrus Coronata*). In: 21º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências de Materiais. **Anais...** Cuiabá: 2014. Disponível: <http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/204-041.pdf>. Acesso: 15 mar. 2019.

OLIVEIRA, R.; CUNHA, A. B.; RIOS, P. D.; BRAND, M. A.; Caracterização da matéria-prima e o carvão vegetal produzido no contexto da agricultura familiar na Grande Florianópolis-SC. In: 27º SIC UDESC. Seminário de Iniciação Científica. Universidade do Estado de Santa Catarina. **Anais...** Santa Catarina: 2017.

OLIVEIRA, E.; VITAL, B. R.; PIMENTA, A. S.; LUCIA, R. M. D.; LADEIRA, A. M. M.; CARNEIRO, C. O.; Estrutura anatômica da madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. **Revista Árvore**, v.30, n.2, p.311-318, 2006.

PAULA, J. E.; JÚNIOR, F. G. S.; SILVA, A. P. P.; Caracterização anatômica de madeiras nativas de matas ciliares do centro-oeste brasileiro. **Scientia Forestalis**. IPEF, Piracicaba. n. 58, p 73-89. 2000.

PERDIGÃO C. R. V.; BRAGA JÚNIOR, M. M.; GONÇALVES, T. A. P.; ARAUJO, B. S.; MORI, F. A.; BARBOSA, A. C. M. C.; SOUZA, F. I. B.; MOTTA, J. P.; MELO, L. E. L.; Forestry control in the Brazilian Amazon I: wood and charcoal anatomy of three endangered species. **IAWA Journal**, v. 41, n. 4, p. 490-509, 2020.

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.

PEREIRA, A. F.; **Madeiras brasileiras: guia de combinação e substituição**. Editora Blücher. 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. C.; Estudo da degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* através de termo gravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.37, n.3, p.567-576, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; MAGALHÃES, M. A.; Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria: v. 26, n.2, p. 545-557, 2016.

PEREIRA, A. A.; LIMA, M. D. R.; PATRÍCIO, E. P. S.; NUMAZAWA, S.; GOULART, S. L.; PROTÁSIO, T. P.; Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 127, p. 1-12, 2020.

POLETTI, M.; Thermal degradation and morphological aspects of four wood species used in lumber industry. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 5, p. 941-948, 2016.

PRIOR, J.; GASSON, P. Anatomical changes on charrings in African hardwoods. **IAWA JOURNAL**, Leiden, v. 14, n. 1, p. 77-86, 1993.

PULIDO-NOVICIO, L. HATA, T.; KURIMOTO, Y.; DOI, S.; ISHIHARA, S.; IMAMURA, Y.; Adsorption capacities and related characteristics of wood charcoals carbonized using a one-step or two-step process. **Journal of Wood Science**. N. 47. p 48-57, 2001.

QUIRINO, W. F. DO VALE, A. T.; DE ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S.; Poder calorífico da madeira e materiais lignocelulósicos. **Revista da Madeira**, n. 89, p. 100-106, 2005.

RAAD, T. J.; Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**. Brasília: 2015.

RAAD, T. J.; PINEHIRO, C. C.; YOSHIDA, M. I.; Equação Geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.

RAMOS, D.C.; CARNEIRO, A.C.O.; TANGSTAD, M.; SAADIEH, R.; PEREIRA, B.L.C. Quality of wood and charcoal from eucalyptus clones for metallurgical use. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.2, p.1-8, 2019.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal: Importância do conhecimento fundamental**. 2006. Belo Horizonte, MG. 2006.

ROWELL, R. M.; Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. **Boca Raton: CRC Press**. ed. 2, 2012.

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

SCHONINGER, E. C.; ZINELLI, M. R.; Análise qualitativa dos carvões de *Apuleia leiocarpa* e *Hymenaea courbaril* produzidos numa carvoaria de Matupá, no Estado de Mato Grosso. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v.10, n.2, p.135-140, 2012.

SÃO PAULO (Estado). Resolução nº 10 SAA, de 14 de dezembro de 2015. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**. Poder Executivo, São Paulo, SP, v. 125, n. 232, 15 dez. 2015.

SAMPAIO, J. A.; SAMPAIO, F. A. N. G.; **Determinação das densidades de sólidos e de polpa**. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.; org. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais. CETEM: Rio de Janeiro, 2007. 570 p.

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

SANTOS, M. A. S. Uso do carvão vegetal em alto forno. In: Fórum Nacional de Carvão Vegetal, SIF, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: 2008.

SECCHI, M. I.; MARIANI, L. F.; KAUFFMANN, M.; OSTERKAMP, I. C.; BAUERMANN, S. G.; JASPER, A.; Anatomia do carvão de espécies nativas da região do Vale do Taquari (Bioma Mata Atlântica) - base de dados para estudos arqueobotânicos. **Estudo & Debate**. Lajeado, v. 24, n. 3, p. 29-43, 2017.

SEVERO, E. T. D.; **Estudo sobre efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid**. 1998. Tese (Doutorado) em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais – Departamento Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Curitiba.

SIEBENEICHLER, E. A.; DA COSTA, L. M.; FIGUEIREDO, N. A.; TRONTO, J.; ROCHA, P. A.; Influência de temperatura e taxas de aquecimento na resistência mecânica, densidade e rendimento do carvão da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. **Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science). v. 8, n. 2, p. 82-94, 2017.

SILVA, L. F. F.; CASTRO, A. R. S.; OLIVEIRA, R. S.; LOBATO, C. C. S.; BARROS, D. S.; Avaliação tecnológica do carvão vegetal de resíduos de serraria produzidos sob diferentes condições de carbonização. In: II Congresso Internacional das Ciências Agrárias COINTER - PDVAgro 2017. Instituto Federal do Rio Grande do Norte. **Anais...** Natal: 2017, 9 p.

SILVA, A. C.; ARANTES, D. C.; GONÇALVES, F. G.; ALMEIDA, M. N. F.; SANTOS, L. M. H.; ANDRADE, J. K. B.; MININI, D.; Qualidade do carvão vegetal produzido com resíduos de eucalipto. **Scientia Forestalis**. Piracicaba: v. 47, n. 123, p. 536-544, 2019.

SILVA, R. C.; MARCHESAN, R.; RONSECA, M. R.; DIAS, A. C. C.; VIANA, L. C.; Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, p. 1-10, 2018.

SILVÉRIO, D. S.; ALENCAR, S.; MOUTINHO, P.; Amazônia em chamas. **Nota técnica do Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia**. IPAM Amazônia. Brasília. 2019. 9 p.

SOARES, L. G.; SILVA, D. C.; BERGO, M. C. J.; CORADIN, V. T. R.; BRAGA, J. W. B.; PASTORE, T. C. M.; Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeiras amazônicas. **Química Nova**. v. 40, n. 4, 418-426, 2017.

SOARES, V.C.; BIANCHI, M.L.; TRUGILHO, P.F.; PEREIRA, A.J.; HÖFLER, J. Correlations between the properties of eucalyptus hybrids wood and charcoal. **Revista Árvore**, v.38, n.3, p.543-549, 2014.

SOUZA, M. J. C.; SILVA, K. S.; PERDIGÃO, C. R. V.; SILVA, G. R.; MELO, L. E. L.; Anatomia do lenho carbonizado de espécies madeireiras comercializadas na Amazônia. **Boletim Técnico nº 8**. Fundação Casa da Cultura de Marabá, 6 p., 2015.

THERY-PARISOT, I.; HENRY, A.; CHRZAVEZ, J.; **Cadernos do LEPAARQ**. v. XIII, n. 25, 511-536, 2016.

THOMAS, R.; Anatomy of the endemic palms of the Near and Middle East: archaeobotanical perspectives. **Revue d'ethnoécologie [En ligne]**. v. 4, 2013. 16 p.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A.; Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea Courbaril* L.). **Scientia Agraria**. v. 2, n. 1, 2001.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; REGAZZI, A. J.; DA SILVA, J. R. M.; Efeito da água quente e pressão na determinação da densidade básica da madeira. **Scientia Forestalis**, n.62, p.40-47, 2002.

YATIM, B.B.; HOI, W.K. The quality of charcoal from various types of wood. **Fuel**, v.66, p.1305-1306, 1987.

YBERT-SCHEEL, R.; Teoria e métodos em antracologia: 2 - Técnicas de campo e de laboratório. **Arquivos do Museu Nacional**. Rio de Janeiro: v.62, n.4, p.343-356, 2004.

WINANDY, J. E.; ROWELL, R. M. The Chemistry of Wood Strength. In: ROWELL, R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. **Boca Raton: Taylor and Francis**. 2005.

WOOTEN, J.B. SEEMAN, J.I.; HAJALIGOL, M.R. Observation and Characterization of cellulose pyrolysis intermediates by ¹³C CPMAS NMR. A new mechanistic model. **Energy Fuels**, v.18, p.1-15, 2004.

WOTTON, M.; GOULD, J. S.; TAYLOR, S. W.; Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest. **International Journal of Wildl and Fire**. n. 21, p. 270–281, 2012.

VALE, A.T; ABREU, V.L.S; GONÇALEZ, J. C; COSTA, A.F. Estimativa do Poder Calorífico Superior do Carvão Vegetal de madeiras de *Eucalyptus grandis* em função do Teor de Carbono Fixo e do Teor de Material Volátil. **Revista Brasil Florestal**. n. 73, 2002.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

VASCONCELOS, J.S.; de ARAÚJO, V.A.; BIAZZON, J.C.; BARREIROS, R.M.; Biaggioni, M.A.M.; Análise de tipos de materiais como cadinho e recipiente para carbonização de madeira. In: 60º Congresso Brasileiro de Química (CBQ). **Anais...** 2021.

VASCONCELOS, J. S.; BARREIROS, R. M.; SEVERO, E. T. D. Anatomical characteristic at 350 °C of *Dipterix* sp., *Hymenaea* sp., *Grevillea robusta* e *Cedrela* sp.. In: 8th International Symposium on Natural Polymers and Composites - ISNaPol 2018. **Anais...** São Pedro: 2018.

VASCONCELOS, J. S.; VASCONCELOS, J. C. S.; SANTOS, D. P.; VILLEGAS, C.; ARAÚJO, V. A.; BIAGGIONI, A. M.; Bayesian logistic regression: An application for carbonisation damage in four wood species, **Wood Material Science & Engineering**. 2021.

VASCONCELOS, J. C. S.; ORTEGA, E. M. M.; VASCONCELOS, J. S.; CORDEIRO, G. M.; VIVAN, A. L.; BIAGGIONI, M. A. M.; A new heteroscedastic regression to analyze mass loss of wood in civil construction in Brazil. **Journal of Applied Statistics**. 2021.

VIDAURRE, G. B.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, R. C.; VALLE, M. L. A.; Propriedades energéticas da madeira e do carvão de Paricá (*Schizolobium amazonicum*). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.2, p.365-371, 2012.

VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. S.; BARAÚMA, E. E. P.; NAPOLI, A.; Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **CERNE**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, Disponível: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602013000100008&lng=en&nrm=iso>. Acesso: 01 Nov. 2019.

VILAS BOAS, M. A. V.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M.; MARTINS, M. A.; Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 481-490, 2010.

VITAL, B.R.; JESUS, R.M. de.; VALENTE, O.F. 1986. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**: v.10, n.2, p. 151-160, 1986.