

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL
CAMPUS DOIS VIZINHOS

VINICIUS CASSIANO FERREIRA SILVA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CARVÃO VEGETAL
DE *Hovenia dulcis Thunberg*

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

DOIS VIZINHOS
2021

VINICIUS CASSIANO FERREIRA SILVA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CARVÃO VEGETAL
DE *Hovenia dulcis Thunberg*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior de Engenharia Florestal da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal. Orientadora: Prof. Dra. Flávia Alves Pereira.

DOIS VIZINHOS

2021



TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DO CARVÃO VEGETAL DE *Hovenia dulcis* Thunberg.

por

VINÍCIUS CASSIANO FERREIRA SILVA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 07 de maio de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof^a. Dr^a. Flávia Alves Pereira
Orientadora

Msc. Ana Carolina Ricardi
Engenheira Florestal

Prof^a. Dr^a. Mara Lúcia Agostini Valle
Membro titular (UFSB)

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus e a Nossa Senhora Aparecida quem me guiou e protegeu por todo esse período de busca de uma realização única que é a graduação.

A minha orientadora, Profª Dra. Flávia Alves Pereira por todo o conhecimento compartilhado e paciência ao transmiti-lo, estando sempre à disposição nos momentos de dúvidas.

Aos meus colegas de graduação pela amizade e companheirismo durante e após a universidade, dando conforto nos momentos de fragilidade e partilhando as vitórias quando conquistadas, tornando uma segunda família para mim.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todas as oportunidades cedidas as quais foram de grande importância para meu crescimento acadêmico e pessoal.

A Analisse Tainá por todo incentivo, amizade e fé depositada em mim, sempre me impulsionando a buscar o meu melhor. Ao Guilherme Cassiano por ter sido uma base sólida familiar em um período de vulnerabilidade emocional.

E por fim aos meus pais Luiz Francisco da Silva e Lourdes de Moura Ferreira a quem dedico essa vitória, que mesmo em meio as turbulências pessoais nunca mediram esforços para que eu pudesse correr atrás dos meus sonhos, essa fase da minha vida só foi possível graças aos seus sacrifícios. Muito obrigado!

“Grandes realizações são possíveis quando se dá importância aos pequenos começos.” – Lao-tsé

RESUMO

SILVA, Vinícius C. F. **Caracterização mecânica do carvão vegetal de *Hovenia dulcis Thunberg***. Trabalho de conclusão de curso II. Curso Superior de Engenharia Florestal, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Dois Vizinhos. Dois Vizinhos, 2021.

O carvão vegetal é uma alternativa para substituir o uso de carvão mineral (coque) nas indústrias metalúrgicas. Mesmo sendo um recurso renovável, ecológico e de fácil produção, o carvão vegetal ainda possui baixa resistência mecânica e alta friabilidade, acarretando muitas perdas nos processos de transporte, manuseio e alocação. Existem algumas normas específicas para testes em carvão vegetal, entretanto não há nenhuma norma que avalie especificamente a resistência à compressão, dificultando assim a padronização do teste. O presente estudo teve como objetivo realizar testes para determinação da resistência mecânica do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*. O carvão foi submetido à testes de compressão, baseado na quebra do material por meio de uma carga compressiva pré-definida, o experimento foi conduzido em duas etapas, onde a primeira etapa foi realizada no laboratório da madeira na UTFPR campus Dois Vizinhos e a segunda etapa nas dependências da empresa WEG Equipamentos Elétricos S/A. Foram adotadas 3 marchas de carbonização (350°C, 450°C e 550°C) para realização dos testes, e analisado a resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade e a densidade relativa aparente do carvão vegetal. Os resultados demonstraram que a marcha de carbonização 2 com taxa de aquecimento igual a 1,66 °C/min, com período de carbonização de 5 horas e temperatura final de 450 °C produziu melhores carvões com propriedades mecânicas. Para os ensaios mecânicos observou-se um aumento nas características de resistência e elasticidade do carvão de *Hovenia dulcis* na marcha 2. A densidade relativa aparente apresentou alta correlação positiva com a resistência a compressão e a elasticidade do carvão vegetal, constatando que, quanto maior a densidade do material, maior será sua resistência.

Palavras-chave: carbonização – resistência mecânica – módulo de elasticidade – densidade aparente – compressão paralela às fibras

ABSTRACT

SILVA, Vinícius C. F. **Mechanical characterization of *Hovenia dulcis* Thunberg charcoal.** Course completion work II. Higher Course of Forest Engineering, Federal Technological University of Paraná - Dois Vizinhos Campus. Dois Vizinhos, 2021.

Charcoal is an alternative to replace the use of mineral coal (coke) in the metallurgical industries. Even though it is a renewable, ecological and easily produced resource, charcoal still has low mechanical resistance and high friability, causing many losses in the processes of transportation, handling and allocation. There are some specific standards for tests on charcoal, however there is no standard that specifically evaluates the compressive strength, thus making it difficult to standardize the test. The present study aimed to carry out tests to determine the mechanical resistance of charcoal from *Hovenia dulcis*. The coal was subjected to compression tests, based on the breaking of the material by means of a pre-defined compressive load, the experiment was conducted in two stages, where the first stage was carried out in the wood laboratory at UTFPR campus Dois Vizinhos and the second step on the premises of the company WEG Equipamentos Elétricos S / A. Three carbonization marches (350 ° C, 450 ° C and 550 ° C) were used to carry out the tests, and the compressive strength parallel to the fibers, elasticity modulus and the apparent relative density of the charcoal were analyzed. The results showed that the carbonization march 2 with heating rate equal to 1.66 ° C / min, with a carbonization period of 5 hours and a final temperature of 450 ° C produced better coals with mechanical properties. For the mechanical tests, an increase in the resistance and elasticity characteristics of *Hovenia dulcis* coal was observed in gait 2. The apparent relative density showed a high positive correlation with the compressive strength and elasticity of the charcoal, confirming that the greater the the density of the material, the greater its resistance.

Keywords: carbonization – mechanical resistance – modulus of elasticity – apparent density - compression parallel to the fibers

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1. Contexto energético do carvão vegetal	12
3.2. Principais usos do carvão vegetal	13
3.2.1 Carvão vegetal na siderurgia	15
3.3 Variáveis do processo de carbonização que interferem na qualidade do carvão vegetal	16
3.4 Propriedades físicas do carvão vegetal	18
3.4.1 Umidade	18
3.4.2 Porosidade	19
3.4.3 Densidade	19
3.5 Propriedades mecânicas do carvão vegetal	20
3.6. <i>Hovenia dulcis</i> (Uva do Japão)	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1. Descrição Geral	23
4.2 Coleta a campo	24
4.3 Processo de carbonização	24
4.5 Teste de resistência à compressão	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais polos fabricantes de carvão vegetal no Brasil.	15
Figura 2: Ilustração da variação da temperatura em toras de mesmo comprimento e diâmetros distintos.	17
Figura 3: Variação da densidade aparente do carvão com a densidade básica da madeira.....	19
Figura 4: Localização do município de Dois Vizinhos-PR.....	23
Figura 5: Representação do ensaio de compressão paralela às fibras do carvão vegetal.....	26

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Consumo de carvão vegetal na indústria brasileira.....	14
Gráfico 2: Valores médios de Densidade Relativa Aparente (DRA) do carvão de <i>Hovenia dulcis</i> em diferentes marchas de carbonização.....	27
Gráfico 3: Influência das temperaturas de carbonização (°C) nas propriedades mecânicas do carvão vegetal de <i>Hovenia dulcis</i>	30
Gráfico 4: Relação entre a temperatura final de carbonização e a resistência a compressão e ao módulo de elasticidade do carvão vegetal de <i>Hovenia dulcis</i>	30
Gráfico 5: Relação entre a densidade relativa aparente e a resistência a compressão e ao módulo de elasticidade do carvão vegetal de <i>Hovenia dulcis</i>	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação da quantidade finos gerados de carvão vegetal em função da umidade inicial da madeira.....	20
Tabela 2: Marchas de carbonização utilizadas para carbonizar as madeiras de <i>Hovenia dulcis</i> .24	
Tabela 3: Valores médios para o módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal de <i>Hovenia dulcis</i>	29

1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é um subproduto da madeira que possui propriedades físicas, químicas e mecânicas altamente variáveis. Este produto é submetido a vários testes com o intuito de alcançar as características de interesse, tais como, densidade, poder calorífico e altas concentrações do teor de carbono. Vários são os fatores que podem interferir na qualidade do carvão, como a umidade, densidade, composição química e a temperatura de carbonização da madeira.

No Brasil, o carvão vegetal é um produto de suma importância para a economia e setor industrial, principalmente, para as siderúrgicas onde é concentrado o maior consumo deste produto, utilizado como termorredutor do minério de ferro, para obter principalmente ferro gusa e aço. Em torno de 85% do carvão produzido nacionalmente é destinado para as indústrias, 9% para consumo residencial e 1,5% para o setor comercial como churrasqueiras e pizzarias. O carvão vegetal foi responsável por produzir cerca de 6,5 milhões de toneladas de todo o ferro-gusa em altos fornos no ano de 2018 (SINDIFER, 2019).

O carvão vegetal tem sido uma alternativa sustentável para substituir o uso do carvão mineral (coque) em alguns altos fornos no Brasil por ser menos poluente. Durante a queima há emissão de CO₂ para a atmosfera, entretanto, os plantios florestais destinados a carvoaria fazem a função de captação dos gases (CUNHA et al., 1989).

A busca por produtos de origem florestal, e a preocupação com o desgaste das florestas nativas, se tornou conflitante, sendo assim viu-se a necessidade de pesquisas voltadas para plantios de espécies de rápido crescimento e de potencial madeireiro visando suprir a demanda das indústrias de base florestal.

O Brasil é um país com clima favorável ao desenvolvimento várias espécies exóticas como os gênero *Pinus spp* e *Eucalyptus spp.*, espécies com uma vasta ramificação de usos como, construção civil, movelaria, pisos, papel e celulose, energia, dentre outros fins.

Buscando suprir a demanda por madeira, espécies não convencionais vem se destacando como alternativa como é o caso da *Hovenia dulcis*, espécie pertencente à família Rhamnaceae, popularmente conhecida como uva-do-japão (RIGATTO et al., 2001). A *Hovenia dulcis* é uma espécie exótica considerada invasora de grande ocorrência na Argentina, Paraguai e sul do Brasil, de forma dispersa em plantios florestais e florestas nativas. Em alguns estudos pôde constatar que suas características

atendem a indústria madeireira, mesmo que com pouco conhecimento tecnológico, sua madeira seja empregada como lenha em propriedades rurais (CARPANEZZI, 2010).

Para que se possa empregar a madeira de *H. dulcis* em larga escala para produção de energia destinada à siderurgia, é necessário um aprofundamento conceitual das suas características químicas, físicas e anatômicas, podendo assim desempenhar funções semelhantes às de espécies como o eucalipto.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo caracterizar mecanicamente o carvão vegetal de *Hovenia dulcis*, produzido em diferentes marchas e temperaturas finais de carbonização

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a influência das diferentes marchas e temperaturas finais de carbonização na resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*;
- Determinar a densidade aparente do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*
- Correlacionar a densidade aparente do carvão vegetal com a resistência à compressão paralela;
- Correlacionar o carvão vegetal produzido em diferentes marchas e temperaturas finais de carbonização com a resistência à compressão paralela.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Contexto energético do carvão vegetal

A busca por alternativas na diversificação da matriz energética vem sendo a nova medida para os países ao redor do mundo, a fim de se manterem autossuficientes. A utilização de fontes de energias renováveis tem sido uma saída para suprir a demanda interna dos países, prevendo uma possível escassez dos combustíveis fósseis (PACHECO, 2006).

O Brasil é considerado um grande precursor na utilização de energia renovável em nível mundial. Em 2019, sua contribuição na repartição interna deteve de um pequeno acréscimo chegando a 46%, praticamente se equiparando ao ofertado por produtos não renováveis. Isso se deu, basicamente, pela queda interna do petróleo e seus derivados (EPE; Agência Internacional de Energia, 2020).

SOARES FILHO et. al (2002) evidenciam que a biomassa florestal proveniente de florestas plantadas pode ser uma boa fonte de geração de energia limpa e renovável, além de ser grande geradora de empregos. A biodiversidade é o maior diferencial do Brasil quando comparado aos outros países, visto que a sua vasta diversificação permite que se produza energia de várias maneiras (AGRONEGÓCIOS, 2006). Nesse sentido, várias fontes de biomassa são conhecidas, dentre elas, por exemplo: lenha, carvão vegetal, babaçu, óleos vegetais, resíduos vegetais, sisal, biogás e o etanol proveniente da cana de açúcar (SOARES et.al, 2006). Em meados das décadas de 70 e 80 medidas foram tomadas para readequar o uso da energia no Brasil, vários incentivos de pesquisa foram realizados para adequar o uso de fontes energéticas renováveis ao mercado nacional, portanto a biomassa despontou como um grande potencial energético. Como resultado o PRÓ-ÁLCOOL foi criado, além de vários outros programas nessa linha de produção (BRITO, 1990).

As vantagens que a biomassa florestal proporciona, economicamente falando, são que nos países emergentes, ainda é de certa forma abundante e de baixo custo de aquisição, sendo comercializados por tonelada ou por unidade calorimétrica, não necessitando de uma mão de obra qualificada, além de gerar uma relação homem-campo. Entretanto, para algumas fontes de biomassa, a necessidade de um planejamento, pesquisa e investimento tem sido cada vez mais importante para que haja uma produção mais efetiva, como ocorre com os derivados da madeira (BRASIL, 1996).

É clara a importância da biomassa florestal como uma alternativa para o setor energético, seja ela por um contexto histórico ou territorial (país, região, estado ou município). Conseqüentemente, a utilização da biomassa deve ser de cunho racional e de otimização juntamente com políticas e diretrizes para que se tenha um desenvolvimento econômico e não seja esquecida ao decorrer do tempo (LIMA e BAJAY, 2000).

A madeira, na sua forma indireta, é uma das maiores provedoras de biomassa florestal comerciável, na qual se consideram três grandes produtos secundários: *pellets*, briquetes e carvão vegetal. De maneira geral, a biomassa sob a forma de briquetes se encontra mais difundida nos países em estágio de desenvolvimento, onde predominam de fornos mais rústicos, enquanto que em países já desenvolvidos, os pellets possuem maior difusão, principalmente com alimentação automática (BHATTACHARYA, 2002). O carvão vegetal também se enquadra como um importante produto, principalmente para famílias e comunidades em várias nações (SILVA, 2008). Sua utilização é afetada de diversas maneiras como: a disponibilidade de recursos florestais, legislações ambientais, nível de desenvolvimento do país e por competição econômica com outras fontes da matriz energética como os não renováveis (petróleo, gás natural e energia nuclear) (BRITO, 2007).

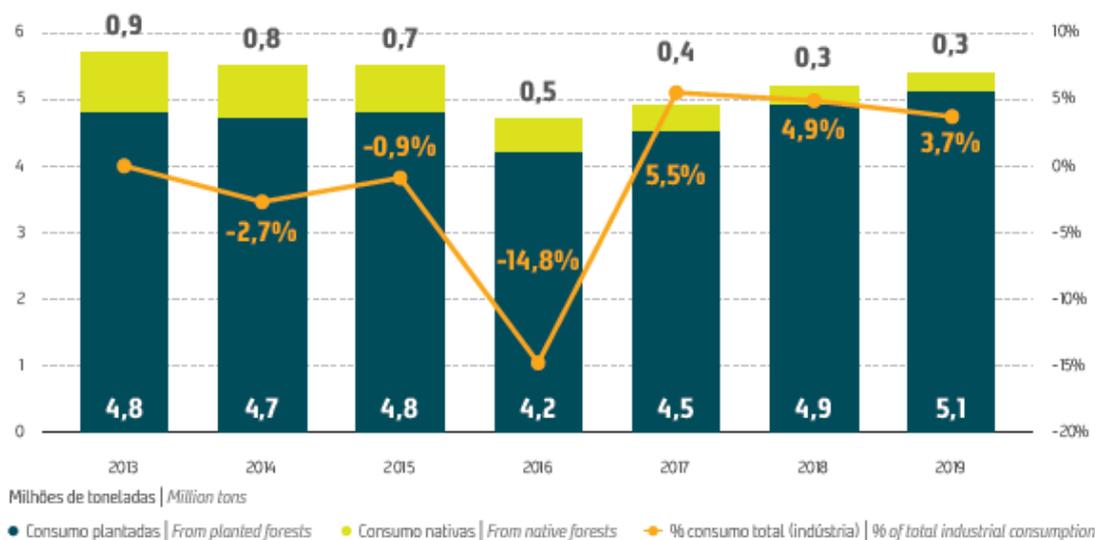
3.2. Principais usos do carvão vegetal

O Brasil se encontra no topo do ranking mundial de maior produtor e consumidor de carvão vegetal, por ter como base esse tipo de fonte renovável o país é o único a manter um parque industrial siderúrgico (BARCELLOS, 2007). Em um levantamento realizado em 2009 constatou-se que o carvão produzido em território nacional ainda contava com uma parcela significativa de matéria-prima oriunda de florestas nativas. Segundo a Associação Mineira de Silvicultura (2009), os plantios florestais ainda não eram capazes de preencher a lacuna de demandas das empresas consumidoras do carvão produzido, ocorrendo um déficit de quase 50% ao ano, recorrendo à utilização de madeiras nativas para suprir essa demanda. Rezende e Santos em 2010, realizaram uma análise da cadeia produtiva especificamente em Minas Gerais na qual previam que deveria haver um impulsionamento da demanda de madeiras provenientes de florestas plantadas na produção de carvão vegetal a fim de cobrir o uso de madeiras nativas, devido principalmente às restrições ambientais e também das exigências do mercado consumidor. Uma das razões por trás dessa insuficiência

produtiva se dava pela concentração da produção em regiões definidas estrategicamente pela demanda, por isso para alguns segmentos industriais, a necessidade desse suprimento é ainda mais crítico. O carvão vegetal produzido a partir de florestas plantadas foi alavancando a produção no decorrer da última década, passando os 2,09 milhões de toneladas em 2001 para 4,8 milhões de toneladas em 2013, sendo um aumento acumulado de 129% (IBÁ, 2016).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2020) em 2019 o Brasil teve um crescimento em relação ao ano anterior de 3,7%, chegando a 5,4 milhões de toneladas de carvão vegetal consumidos. O setor de florestas plantadas teve uma participação majoritária na produção de madeiras para o setor siderúrgico, fornecendo cerca de 95% de madeiras oriundas de reflorestamento (IBGE, 2019). Este consumo teve um salto em relação ao ano anterior, passando de 4,9 para 5,1 milhões de toneladas produzidas de reflorestamentos, conforme demonstrado no gráfico 1 (IBÁ, 2020).

Gráfico 1: Consumo de carvão vegetal na indústria brasileira.

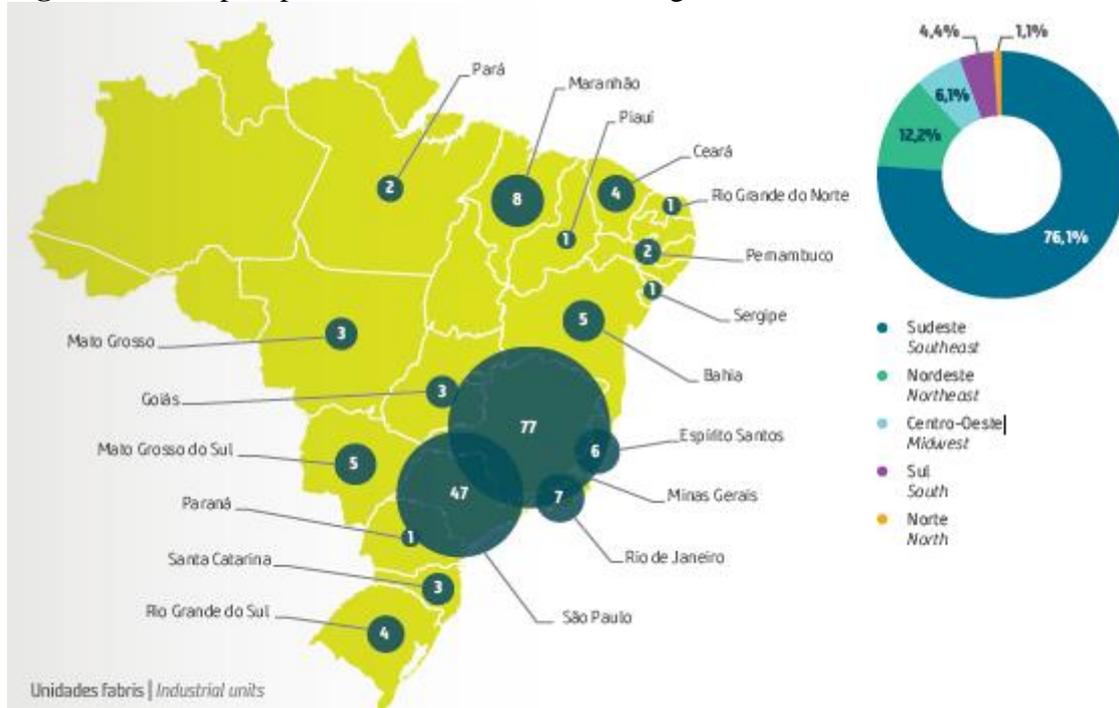


Fonte: EPE e IBGE, 2020.

A região Sudeste é a região com o título de maior produtor de carvão vegetal no Brasil chegando a 76% da produção nacional, seguido da região nordeste com 12% e da região centro-oeste com 6% da produção nacional (IBÁ, 2020). A produção de carvão vegetal no país se distribui em vários setores, com foco principal para o setor industrial como a siderurgia, metalurgia, empresas do setor civil na produção de cimento, termoeletricas na geração de energia, além do consumo residencial, seja em áreas urbanas ou rurais (CGEE, 2015). No território nacional existem cerca de 180 indústrias especializadas em minério de ferro que utilizam o carvão vegetal em seu processo de

produção. O polo de consumo do carvão vegetal se encontra no estado de Minas Gerais com cerca de 77 unidades fabris, seguido de São Paulo com 47 unidades e Maranhão com 8 unidades consumidoras deste produto (IBÁ, 2020), conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Principais polos fabricantes de carvão vegetal no Brasil.



Fonte: IBÁ, 2020

3.2.1 Carvão vegetal na siderurgia

Dentro do setor siderúrgico existem as siderúrgicas integradas e as independentes. As siderúrgicas independentes são as únicas voltadas para produção de ferro-gusa (*merchant pig iron*), enquanto que as integradas (*integrated steel mills*) são responsáveis pela manipulação e fabricação dos produtos derivados do aço, como por exemplo os tarugos, placas, chapas e bobinas (MONTEIRO, 2006). Segundo Vital e Pinto (2011), cerca de 86% de todo o carvão produzido em território nacional são destinados ao mercado guseiro.

A cadeia produtiva do carvão vegetal é fortemente ligada ao setor siderúrgico, visto que os polos industriais voltados para esse setor se concentram nos Estados que possuem as maiores reservas de minério de ferro e de florestas plantadas destinadas somente a essa atividade, tendo uma relação direta entre as matérias primas

No processo de produção do ferro-gusa existem dois tipos de insumos que podem ser utilizados, o carvão vegetal e o carvão mineral. O coque (carvão mineral)

possui propriedades físicas, químicas e geométricas diferentes do carvão vegetal e sua utilização é mais viável, economicamente, tendo em vista que o carvão vegetal, por ser um insumo relativamente novo no mercado, há pouco estudo, o custo de implantação é mais oneroso, devido ao seu investimento na silvicultura. Ressalta-se que sua utilização é mais sustentável, suprindo o carbono produzido na obtenção do ferro gusa, além de ser um recurso renovável, diferentemente do coque mineral (MOTA, 2013).

Uma dificuldade recorrente ao uso do carvão vegetal na siderurgia é a variação da qualidade do mesmo, devido as propriedades da madeira extraída, dos fornos e das condições operacionais da carbonização. Essa instabilidade leva ao desperdício do material, tornando-o muitas vezes friável, dificultando a operação dos fornos siderúrgicos (TRIGULHO, 2001).

Mesmo o Brasil sendo o maior produtor de carvão vegetal do mundo, a tecnologia mais difundida para produzir carvão vegetal ainda é aquela realizada em fornos de barro, com um baixíssimo rendimento da madeira e elevada liberação de gases em sua combustão (UHLIG, 2008). A utilização de fornos com uma tecnologia mais avançada proporcionaria melhorias no rendimento da madeira, evitando desperdícios e com baixa taxa de emissão de gases poluentes, já que estes seriam reutilizados como coprodutos, prática utilizada em empresas de grande porte (MOTA, 2013). Santos e Hatakeyama (2012) observaram que a produção do carvão utilizando cilindros metálicos reduzem até 25% o consumo da lenha, quando comparado ao processo tradicional. Outro fator considerado um benefício ambiental é a substituição do carvão mineral por carvão vegetal na produção de ferro-gusa como “aço verde”, inserindo no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

3.3 Variáveis do processo de carbonização que interferem na qualidade do carvão vegetal

A madeira é composta basicamente de oxigênio, água, hidrogênio, nitrogênio, sais minerais e carbono (OLIVEIRA, 1980), sendo o carbono um dos componentes da biomassa de maior interesse na carbonização. O carvão vegetal é definido por Mendes et. al (1998) como um material sólido, poroso, de fácil combustão e capaz de gerar significativas quantidades de calor (6.800Kcal/kg).

A carbonização, é um processo na qual a madeira é aquecida a temperaturas acima de 300 °C, em ambiente fechado, com pequenas porcentagens ou até mesmo sem nenhuma incorporação de ar, liberando gases, vapores d'água e líquidos orgânicos,

restando ao final do processo principalmente o carvão vegetal e o alcatrão (PINHEIRO, 2006)

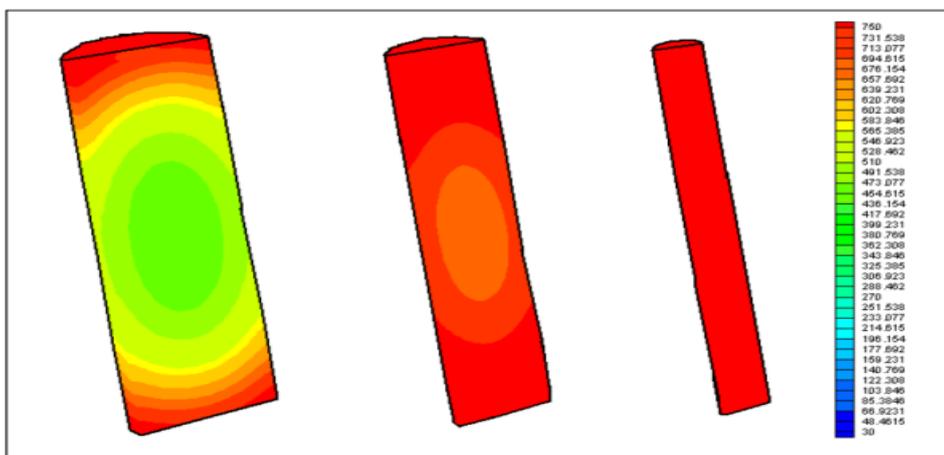
Segundo Rezende (2006), o procedimento para a carbonização da madeira acontece em quatro etapas:

- Primeira etapa – Secagem: ocorre até 110 °C, quando apenas a umidade é liberada;
- Segunda etapa – Torrefação: ocorre entre 110 e 250 °C, sendo que, na temperatura de 180°C, tem início a liberação da água de constituição pela decomposição da celulose e hemicelulose. Pouco peso é perdido até 250 °C. Forma-se o tiço ou madeira torrada;
- Terceira etapa – Carbonização: ocorre entre 250 e 350 °C e, com a intensificação da decomposição da celulose e hemicelulose, ocorre expressiva perda de peso, formando-se gás, óleo e água. Ao atingir a temperatura de 350 °C, o carvão possui 75% de carbono fixo e se considera que a carbonização está praticamente pronta;
- Quarta etapa – Fixação: dos 350 °C em diante, ocorre redução gradual na liberação de elementos voláteis, principalmente gases combustíveis, continuando a fixação do carbono.

O diâmetro e o comprimento da tora são fatores a serem considerados na carbonização, já que influenciam diretamente na distribuição da temperatura e na qualidade do carvão (teor de cinzas). Além disso, podem interferir, posteriormente, na oxigenação do alto-forno (GOMES, 2006).

Oliveira (2009), analisou toras com mesmo comprimento e diâmetros distintos e verificou que quanto maior o diâmetro, mais tempo ele levará para que a temperatura se uniformize por toda a tora. O autor também observou a formação de atíço em madeiras verdes e em madeiras com menores diâmetros a formação de cinzas, isso ocorre porque a temperatura no interior e superfície das toras de menores diâmetros se encontra mais homogênea, enquanto que no interior e superfície das toras de maiores diâmetros os valores encontrados de temperaturas são heterogêneos como pode verificar na figura 2:

Figura 2: Ilustração da variação da temperatura em toras de mesmo comprimento e diâmetros distintos.



Fonte: OLIVEIRA, 2009

Na carbonização, normalmente, são utilizadas madeiras de diâmetro maiores que cinco centímetros e menores que cinquenta centímetros, devido ao fato da dificuldade em carbonizar essas dimensões (MONTEIRO, 2006). Mesmo a temperatura final de carbonização sendo considerada um fator importante, a pressão atmosférica também deve ser levada em consideração por ter um impacto direto nas propriedades do carvão produzido (FIGUEIREDO, 2009).

A umidade é outro fator que interfere significativamente na qualidade do carvão vegetal, pois para produzir um carvão com alto poder calorífico é necessário baixos teores de umidade, pois elevados valores podem diminuir o rendimento do carvão no alto forno (GOMES, 2006). A variação de 1% de umidade pode reduzir o rendimento gravimétrico do carvão em até 0,37% (SAMPAIO, 2008).

As características químicas, físicas e mecânicas da madeira interferem diretamente na qualidade e rendimento do carvão vegetal (SAMPAIO, 2008). Fatores edafoclimáticos e tratos silviculturais também contribuem para que a produtividade deste insumo seja maior.

3.4 Propriedades físicas do carvão vegetal

Analisar as propriedades físicas do carvão vegetal é outra ferramenta para indicar a qualidade do material produzido. As principais propriedades físicas avaliadas são a porosidade, umidade e densidade.

3.4.1 Umidade

O carvão vegetal é um material higroscópico e, por isso, adsorve a água do ambiente. Essa água não é interessante para as operações em alto forno e, com relação a injeção de carvão pulverizado (ICP), causa um maior consumo de carbono, conduzindo à uma perda de calor e uma diminuição da resistência do carvão vegetal (MORAIS, 2015).

Com temperaturas abaixo de 500 °C há aumento na quantidade de poros no carvão e aumento da superfície disponível para adsorção da umidade. Isso ocasiona um aumento do teor de umidade de equilíbrio do carvão (KURAUCHI, 2014).

A umidade contida no carvão vegetal exerce uma grande influência no rendimento dos processos em que ele é utilizado. Há grande geração de finos quando a umidade se encontra acima de 10% (KURAUCHI, 2014). Além disso, altos teores de umidade do carvão podem reduzir sua resistência mecânica (CETEC, 1981).

3.4.2 Porosidade

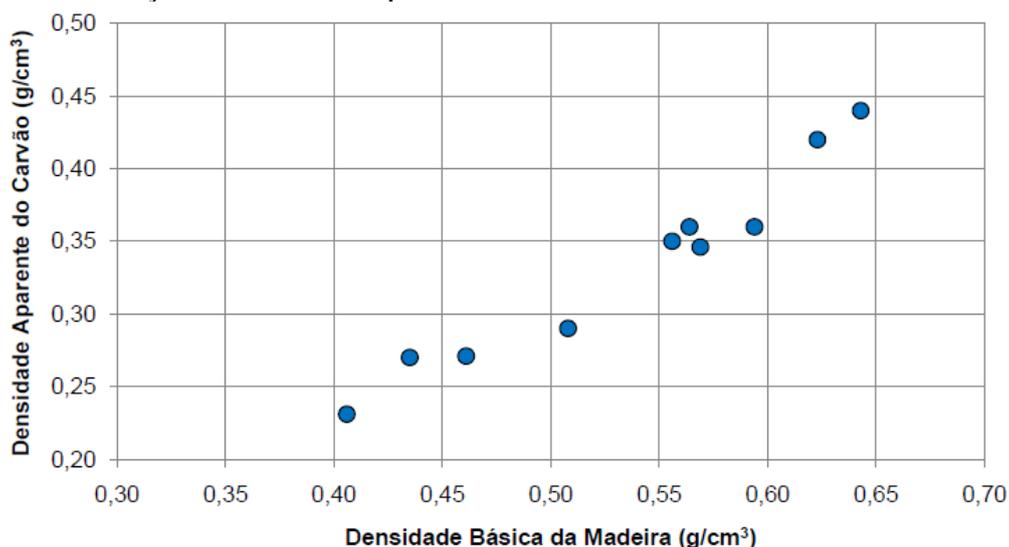
Segundo Barcellos (2007), o carvão vegetal é considerado um material muito poroso, chegando a apresentar uma porcentagem de 80%. A porosidade ideal pode promover um relativo aumento na permeabilidade e melhora na circulação dos gases no interior do alto forno. Dessa maneira, a porosidade afeta diretamente a velocidade com que as reações de redução do minério de ferro ocorrem dentro do auto forno (MATOS e RIOS, 1982).

3.4.3 Densidade

No setor siderúrgico a densidade requerida para o carvão vegetal é superior a 240 kg/cm^3 . Quanto mais denso for este insumo, maior será sua resistência mecânica e menor o volume por ele ocupado, acarretando em um maior espaço para se carregar o minério de ferro, melhorando assim a eficiência do alto forno (GOMES, 2006).

Madeiras que apresentam densidades maiores tendem a possuírem uma maior quantidade de carbono por metro cúbico, deixando mais claro a importância do processo de redução, pois implica numa maior produtividade (FREDERICO, 2009). As densidades da madeira progenitora e do carvão estão diretamente ligadas, visto que, madeiras com densidades e teores de lignina elevados indicam bons rendimentos e qualidade do carvão produzido (PEREIRA et. al, 2000). Essa correlação pode ser vista na Gráfico 2 que utiliza como base dados de variedades de eucaliptos obtidos por Brito e Barrichelo (1980).

Figura 3: Variação da densidade aparente do carvão com a densidade básica da madeira



Fonte: Brito e Barrichelo, 1980.

Segundo Treusch et. al, (2004) entre 300 a $350 \text{ }^\circ\text{C}$ a taxa de perda de massa da madeira é maior que a taxa de diminuição da peça, com a decomposição da celulose

nesse intervalo das temperaturas (SHAFIZADEH, 1984). Entre 350 a 500 °C, a densidade aparente segue constante. Quando alcançado os 500 °C, a diminuição do tamanho da peça acontece de forma mais ágil do que a perda de massa (TREUSCH et. al, 2004).

Um carvão vegetal com finalidade siderúrgica deve ser fisicamente denso, pouco friável, de granulometria uniforme e que seja resistente à compressão (ANDRADE e DELLA LUCIA, 1995).

3.5 Propriedades mecânicas do carvão vegetal

É importante que o carvão apresente resistência mecânica suficiente ao decorrer do processo de produção de ferro-gusa, pois deve suportar a camada de minério de ferro, sem comprometer a permeabilidade do leito (COSTA, 2016). Um dos maiores problemas encontrados na utilização do carvão vegetal como alternativo à um termorreductor do minério de ferro é sua baixa resistência mecânica, quando se comparado ao carvão mineral (coque) (ASSIS, 2016). A friabilidade do carvão vegetal está diretamente relacionada a resistência mecânica do carvão e pode ser entendida como o potencial com que o carvão vegetal tem de gerar finos, quando sujeito a quebras, abrasão ou ruptura (GOMES, 1980).

Os finos são considerados um entrave tanto para os altos-fornos quanto para o rendimento do processo e operações como manuseio, transporte e carga/descarga podem aumentar a geração destes (BRITO, 1993).

A elevada geração de finos no interior do alto forno caracteriza uma baixa resistência do carvão, devido a compactação, abrasão e ação da temperatura em que é submetido (ASSIS, 2016).

A umidade da madeira pode ser um fator que influencia a produção de finos. Quanto mais elevada for a umidade, maior será a quantidade de finos gerados no processo de carbonização (OLIVEIRA et. al. 1982) (Tabela 1).

Tabela 1: Variação da quantidade finos gerados de carvão vegetal em função da umidade inicial da madeira

Umidade (%)	Finos abaixo de 13 mm (%)	Varição em relação ao primeiro ensaio (%)
< 20	11,2	-
20-30	13,5	21
> 30	15,9	42

Fonte: Oliveira et al, 1982. Adaptado

A trincas formadas durante o processo de carbonização podem aumentar a quantidade de finos gerados. Por isso, a secagem das toras é importante para aumentar

as propriedades mecânicas, diminuir a quantidade de energia necessária para este processo e maior rendimento do carvão (OLIVEIRA et, al. 1982).

A temperatura de carbonização é outro fator que interfere na resistência mecânica do carvão. Entre 300 °C a 500 °C, há saídas dos gases voláteis ocorrem em maior intensidade e maior quantidade de poros. Acima de 500 °C ocorre um aumento na resistência à ruptura do carvão (CETEC, 1982).

Blankenhorn et, al. (1972) afirmam que o aumento da resistência pode estar relacionado a vários fatores como redução da saída de materiais voláteis da peça; redução dimensional e aumento do número de fibras por unidade de área; alteração da forma e do tamanho da porosidade; rearranjo estrutural do carbono residual.

Assim como a tensão de ruptura tem suas variações com a temperatura final de carbonização, a resistência à compressão e a rigidez do carvão ocorrem o mesmo. Em um estudo realizado por Moore et al, (1974), utilizando madeira carbonizada de bétula, foi possível observar que houve um significativo aumento do módulo de elasticidade em temperaturas acima de 500 °C, além de uma queda considerável em temperaturas abaixo de 400 °C.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), existem normas específicas para testes em carvão vegetal, como a de determinação de índice de quebra (ABNT NBR 7416), entretanto não há nenhuma norma que avalie especificamente a resistência à compressão, dificultando assim a padronização do teste.

Testes de resistência a compressão propostos por CETEC (1978), visam comparar carvões vegetais de diferentes espécies e diferentes condições de carbonização, e com isso afirmar que alguns fatores como dimensões dos corpos de prova, umidade, temperatura de carbonização, presença de trincas internas e a posição de onde a peça da madeira foi retirada interferem no resultado do teste de resistência mecânica do carvão.

3.6. *Hovenia dulcis Thunberg* (Uva-do-Japão)

Hovenia dulcis Thunberg, popularmente chamada de uva do japão, da família Rhamnaceae, sua ocorrência natural é da região central da China (KOLLER, 1979).

A espécie é cultivada em pequena escala na região Sul do Brasil, com alto poder de condução da regeneração natural, por conta da sua forma de dispersão via zoocoria. Atualmente, há indícios de perturbação da espécie com caráter invasor em grande parte das florestas nativas da região Sul, especialmente em áreas degradadas e em estágio pioneiro (INSTITUTO HORUS, 2007). Na Argentina, a uva-do-japão apresenta em seus plantios comerciais uma produção volumétrica de até 20 m³.ha.ano, em sítios considerados de boa qualidade, aos 10 anos (CARVALHO, 1994). No Brasil, sua variação de crescimento pode chegar até 30 m³.ha.ano.

A massa específica aparente da madeira gira em torno de 0,50 a 0,72 g/cm³ à 15% de umidade. Em relação às suas propriedades físico-mecânicas, a madeira é considerada resistente, mediamente tenaz e elástica, de fácil trabalhabilidade, dando superfícies lisas e brilhantes, porém com pouca durabilidade quando em contato com o solo após sua extração. Uma curiosidade é que suas características se assemelham às do Louro Pardo (*Cordia trichotoma*) (STILLNER et, al. 1983).

Sua utilização é diversificada, podendo ser em forma de madeira serrada e roliça para construção civil, marcenaria, forro, vigas, moirões, movelaria, molduras e laminados. A espécie é adequada para produção de pasta para papel e celulose, entretanto suas fibras limitam certos tipos de papel devido ao seu tamanho. Por isso, alguns estudos indicam a mistura com fibras longas, visando um aumento da resistência mecânica. O uso mais comum no Brasil é para energia.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição da área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas, a primeira foi realizada nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Dois Vizinhos. O município de Dois Vizinhos está localizado no sudoeste do Paraná, no terceiro planalto paranaense, com coordenadas 25° 46' 05" Sul e 53° 03' 10" Oeste, apresentando altitude média de 509 metros (IBGE, 2010). Segundo informações do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IAPAR), baseado no sistema de classificação de Köeppen, o clima de Dois Vizinhos é do tipo “Cfa - Clima subtropical; temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, com verões quentes, tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida.”

Figura 4: Localização do município de Dois Vizinhos-PR



Fonte: PASSOS, 2015.

Este trabalho é uma atividade subsequente ao trabalho de conclusão intitulado “PARÂMETROS DE QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE *Hovenia dulcis* Thunb.” da autora REFFATTI (2019), em que a autora coletou os exemplares de *Hovenia dulcis* oriundos da UNEPE – trilha ecológica do campus universitário. A trilha possui uma área de aproximadamente 3.500 m² e conta com várias unidades de ensino, pesquisa e extensão, além de uma fauna e flora exuberante. A floresta presente no local é caracterizada como uma Floresta Estacional Semidecidual em estágio de regeneração com transição para a Floresta Ombrófila Mista (JUNG et al.2012), onde as atividades de

ensino e pesquisa de alunos e professores, aliados a preservação são objetos de prioridade para a área (SALLA; BERTOLDO; LIMA, 2011).

4.2 Coleta a campo

Os indivíduos abatidos para realização do presente estudo apresentavam DAP entre 10 e 20 centímetros para garantir a padronização. Quatro árvores foram abatidas e a partir do abate, foram retirados cinco discos de 8 cm de espessura para realização do cálculo de densidade básica da madeira, e posteriormente o restante das árvores foram cavaqueadas e transformadas em corpos de prova para os ensaios.

Para evitar a influência da posição radial de amostragem nas propriedades mecânicas do carvão vegetal, optou-se por escolher apenas os corpos de prova de madeira o mais distante possível da medula e que fossem livres de nós, furos ou qualquer outro defeito que pudessem afetar na resistência mecânica do carvão vegetal durante os ensaios de compressão paralela às fibras.

4.3 Processo de carbonização

As carbonizações foram conduzidas em fornos mufla, com aquecimento elétrico, utilizando-se 300 gramas de madeira de *Hovenia dulcis*. Estas foram alocadas em container de metal, um condensado foi acoplado à saída da mufla para que os gases condensáveis fossem recuperados. Neste trabalho foram usados três tratamentos térmicos nas carbonizações, ou seja, foram adotados temperaturas finais de 350°C, 450°C e 550°C, com taxa de aquecimento variando de 1,53 à 1,66 °C por minuto. O tempo à temperatura final de carbonização também variou, sendo de 4 à 6 horas, conforme demonstrado na tabela 3, elaborado por Reffatti (2019).

Tabela 2: Marchas de carbonização utilizadas para carbonizar as madeiras de *Hovenia dulcis*.

Marcha*	Temperatura (°C)							Taxa de aquec. (°C/min)	Tempo total(h)	T° final
	150	200	250	350	450	500	550			
Marcha 1	1h	1h30	1h	30m	-	-	-	1,53	4	350
Marcha 2	1h	1h	1h30	1h	30m	-	-	1,66	5	450
Marcha 3	1h	1h	1h	1h	1h	30m	30m	1,53	6	550

Fonte: REFATTI, 2019, adaptado.

4.4 Confeção dos corpos de prova de carvão vegetal

Após o processo de carbonização das amostras de madeira, a segunda etapa do trabalho consistiu em confeccionar os corpos de prova carbonizados, onde foram modelados com o auxílio de um estilete e lixas buscando alcançar as dimensões de 10 mm x 10 mm x 25 mm (radial x tangencial x longitudinal), de acordo com a metodologia proposta por COSTA (2016).

Foram realizadas avaliações visuais nos corpos de prova com o intuito de classificá-los de acordo com a presença ou ausência de defeitos, como quebras e fissuras, selecionando as melhores amostras. Posteriormente, os corpos de prova foram separados de acordo com sua marcha de carbonização para realização dos testes subsequentes.

4.5 Densidade Relativa Aparente

A densidade relativa aparente do carvão vegetal de *Hovenia dulcis* foi determinada utilizando-se a Norma NBR 9165, na qual as medições foram obtidas com o auxílio de um paquímetro de precisão, de 0,01 mm, e a massa foi obtida por meio de uma balança de precisão.

A fórmula utilizada para obtenção da densidade foi:

$$DRA = M/V$$

Onde:

DRA: Densidade Relativa Aparente (g.cm³)

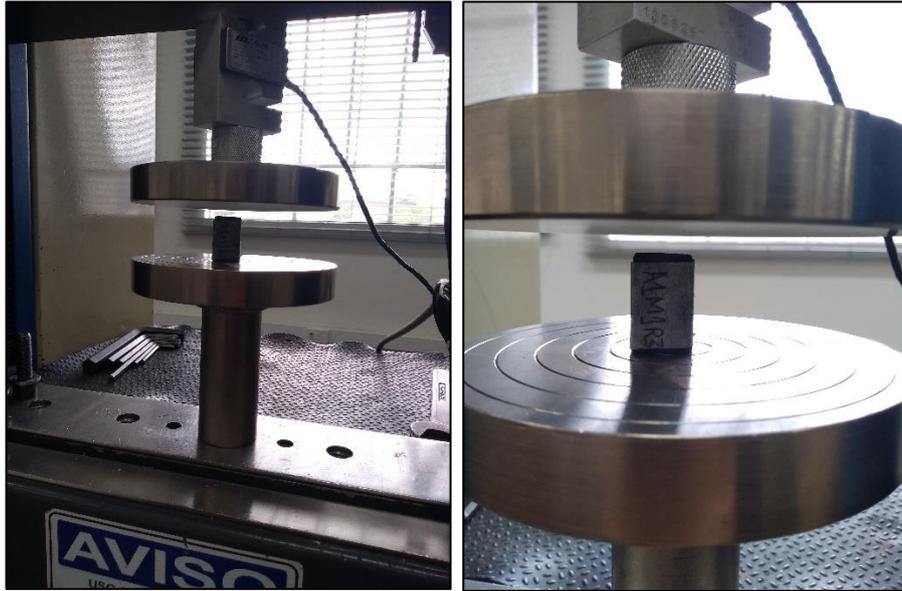
M: Massa (g)

V: Volume (cm³)

4.5 Teste de resistência à compressão

Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) inserida no Parque Fabril I da empresa WEG Equipamentos Elétricos S/A, localizada no município de Jaraguá do Sul/SC. Para a realização dos ensaios, foi adotado a metodologia aplicado por COSTA (2016). No desenvolvimento dos ensaios, foi utilizado uma célula de carga de 500 Kg da máquina universal de ensaio, modelo EMIC DL 30000 (Figura 5), à uma velocidade de compressão de 0,05 mm/min aplicando uma força compressiva no plano radial dos corpos de prova.

Figura 5: Representação do ensaio de compressão paralela às fibras do carvão vegetal



Fonte: O autor, 2020.

4.6 Análise Estatística

A condução deste trabalho foi realizado por meio de um delineamento inteiramente casualizado (DIC), na qual consistia em 03 tratamentos, denominados de marchas de carbonização, e 11 repetições para cada tratamento, somando 33 análises. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias, comparadas pelo Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

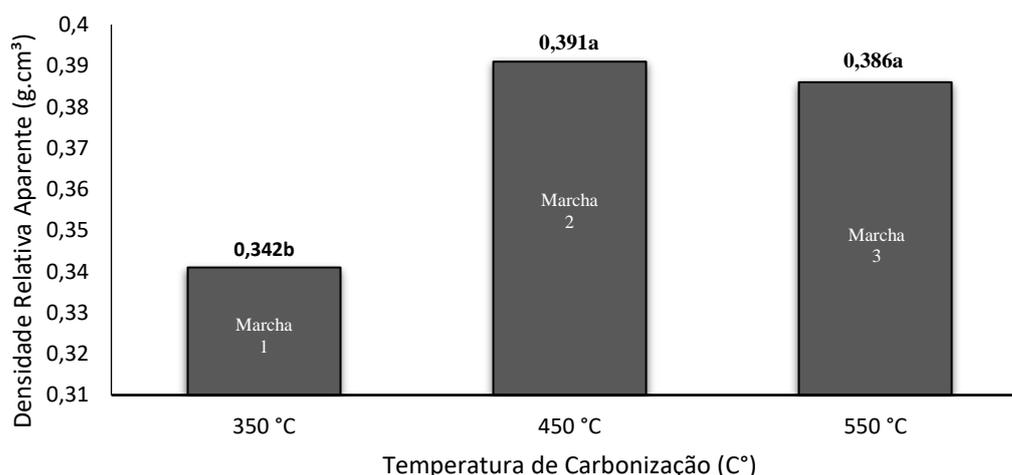
As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software SISVAR 5.7. Para se obter as correlações entre as características estudadas, utilizou-se o cálculo de Coeficiente de Correlação de Pearson (R^2) através do programa Excel 2010® que segundo Figueiredo (2009), se a correlação for igual a +1, significa que é perfeito positivo, neste caso, significa que a correlação é positiva, ou seja, que as variáveis estão diretamente correlacionadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados obtidos é possível observar no gráfico 3 o comportamento da densidade relativa aparente (DRA) do carvão vegetal de *Hovenia dulcis* em diferentes marchas de carbonização.

A densidade relativa aparente do carvão vegetal teve uma variação média de 0,342 a 0,391 g.cm³. As marchas 2 e 3 não diferiram estatisticamente entre si, apresentando as maiores densidades do carvão, sendo em média, 0,391 e 0,386 g.cm³, respectivamente, e a menor densidade encontrada foi na marcha 1 (0,341 g.cm³). Os diferentes valores encontrados podem estar atrelados diretamente a densidade básica da madeira, conforme valores encontrados por Reffatti (2019) em seu estudo sobre *Hovenia dulcis*, em que obteve valores médios de 548,97 kg/m³ a 568,62 kg/m³.

Gráfico 2: Valores médios de Densidade Relativa Aparente (DRA) do carvão de *Hovenia dulcis* em diferentes marchas de carbonização



*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si,

Fonte: O autor, 2020.

Neves et al. (2013) afirmam que quanto maior a densidade básica da madeira, maior será a densidade aparente do carvão vegetal e, conseqüentemente, maior a otimização do processo de produção. De maneira geral, altos valores de densidade básica da madeira indicam um carvão vegetal de maior resistência mecânica, uma vez que as madeiras mais densas tendem a possuírem uma maior quantidade de carbono por metro cúbico (FREDERICO, 2009), ou seja, essa variável se torna um norteador na produção do carvão vegetal, visto que é possível obter maiores rendimentos gravimétricos (SILVA, 2003).

Segundo Santos (2008), para uma densidade aparente do carvão vegetal para siderurgia é desejável que o valor não seja inferior a 0,40 g.cm³. Deste modo, a marcha 2 foi a que apresentou valor mais próximo ao considerado satisfatório para fins siderúrgicos, apresentando a maior densidade aparente dentre as marchas de carbonização. Em estudos semelhantes, Arantes (2009) encontrou valores médios de 0,395 g.cm³ de um experimento clonal entre as espécies de *Eucalyptus grandis* x *urophylla* aos 6 anos de idade. Analisando o comportamento de 7 clones de *Eucalyptus grandis* e 3 clones de *Eucalyptus saligna*, Trugilho et. al (2001) tiveram valores para densidade relativa aparente (DRA) variando entre 0,39 e 0,48 g.cm³. Santos (2010), conduzindo um experimento de *Eucalyptus sp.*, encontrou valores variando entre 0,26 e 0,34 g.cm³ à uma temperatura de carbonização de 450 °C. Valores elevados de densidade relativa aparente são atrativos, principalmente quando se trata de carvão vegetal para abastecimento de fornos na siderurgia, pois quanto maior for a densidade do carvão, menor será o volume ocupado pelo material dentro dos altos fornos, conseqüentemente maior será a capacidade de carga do minério de ferro utilizado no processo, tendo uma maior eficiência na produção de ferro gusa (PIMENTA & BARCELLOS, 2000).

A densidade relativa aparente do carvão vegetal apresentou um crescimento à medida a temperatura de carbonização foi elevada, sendo de aproximadamente 14,32% de aumento entre as temperaturas de 350 °C e 450 °C. Blankenhorn et. al (1978) também observou crescimento de densidade aparente a medida que aumentava a temperatura de carbonização, mais especificamente acima de 600 °C, em que deteve um valor mais significativo. Trugilho e Silva (2001) obtiveram a mesma tendência com *Himenea courbaril*, assim como Oliveira e Almeida (1980) com um experimento de *Eucalyptus grandis*.

Na tabela 3 é possibilitado uma avaliação do efeito das marchas de carbonização nas propriedades mecânicas do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*, apresentado os valores médios encontrados para cada marcha utilizada.

Observou-se que houve diferença significativa em relação às marchas de carbonização adotadas, ou seja, o efeito das velocidades e temperaturas de carbonização correlacionadas nas marchas utilizadas influenciou significativamente na resistência à compressão paralela as fibras (RC) e ao módulo de elasticidade (MOE).

Tabela 3: Valores médios para o módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*

Marchas de Carbonização	Médias	
	MOE (Mpa)	RC (Mpa)
Marcha 1 (350 °C)	752,42 b	6,34 b
Marcha 2 (450 °C)	1.295,68 a	11,07 a
Marcha 3 (550 °C)	1.265,16 a	10,99 a

*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si,

* MOE: Módulo de elasticidade à compressão das fibras do carvão em MegaPascal (MPa).

* RC: Resistência à compressão paralela às fibras do carvão vegetal em MegaPascal (MPa).

MPa: unidade de medida – MegaPascal

Fonte: O autor, 2020.

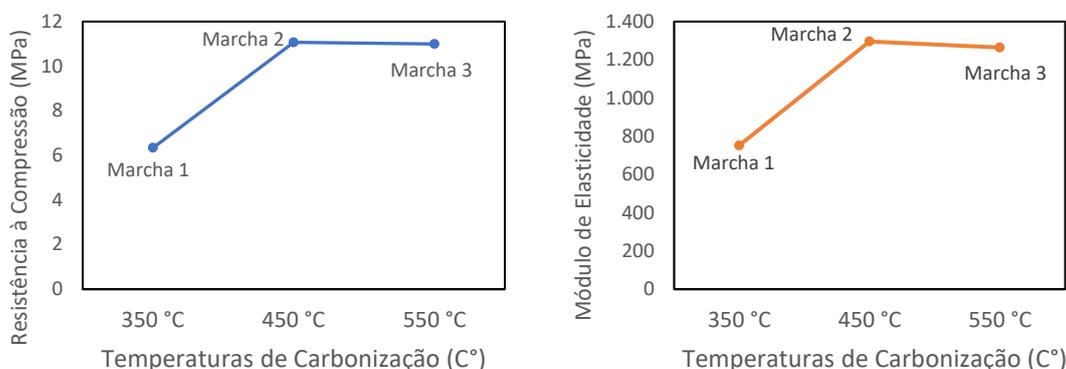
Nota-se que a marcha 1 (350°C) diferiu significativamente das demais marchas, sendo a que obteve menor valor para a resistência à compressão (RC) e para o módulo de elasticidade (MOE). Para as temperaturas de 450°C (Marcha 2) e 550°C (Marcha 3) não houve diferença significativa entre as médias dos corpos de prova para o módulo de elasticidade e da resistência à compressão.

Observou-se um aumento das características de elasticidade e resistência mecânica do carvão vegetal, à medida que se elevava a temperatura de carbonização (Gráfico 4), tendo um crescimento médio de 72% da marcha 1 (350 °C) em relação a marcha 2 (450 °C), e uma constância em relação a marcha 3 (550 °C). A menor resistência do carvão produzida a 350 °C pode ser justificada pela liberação dos gases voláteis do interior do corpo de prova durante o processo de carbonização (COSTA, 2016). Com relação ao aumento da resistência do material encontradas neste trabalho a partir da temperatura de carbonização 450°C , pode ser dizer que ocorreu devido à diminuição dos gases voláteis liberados no processo, no tamanho e formato dos poros existente no corpo de prova, rearranjo estrutural do carbono residual e na redução dimensional e aumento do número de fibras por unidade de área, corroborando também para um aumento na densidade relativa aparente, conforme evidenciado por autores como Moore et al. (1974), Oliveira, Gomes e Almeida (1982), Ferrari e Rezende (1998).

No gráfico 5, estão apresentadas as correlações de interações através do coeficiente de Pearson (R^2) entre as temperaturas de carbonização e as propriedades mecânicas do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*. Observou-se uma correlação positiva das temperaturas de carbonização em relação a resistência à compressão de $R^2= 0,737$ e para o módulo de elasticidade de $R^2=0,705$, isso demonstra uma dependência significativa das propriedades mecânicas em relação as temperaturas de carbonização.

Costa (2016) encontrou valores médios aproximados de $R^2= 0,86$ para módulo de elasticidade e $R^2= 0,89$ para a resistência à compressão paralela as fibras do carvão vegetal de *Corymbia*.

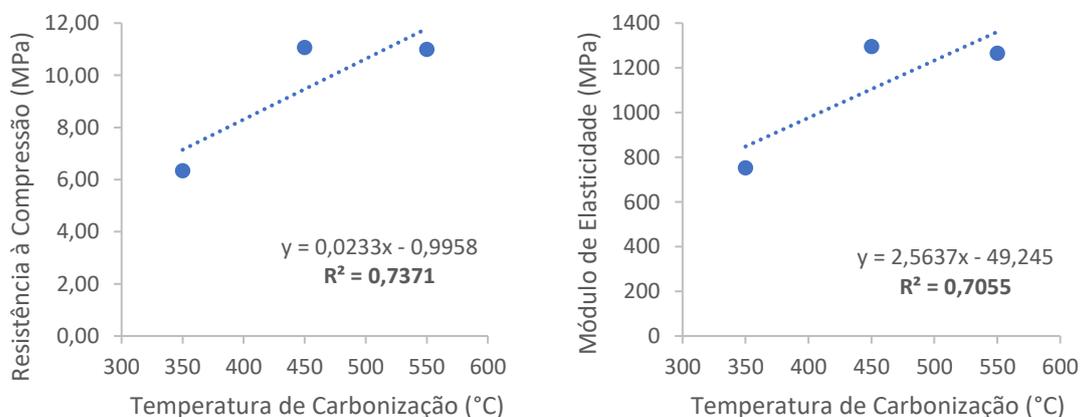
Gráfico 3: Influência das temperaturas de carbonização (°C) nas propriedades mecânicas do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*



Fonte: O autor, 2020.

Mendes et al. (1982) afirmam que a queda nas propriedades mecânicas do carvão vegetal pode também estar relacionado à perda de massa que a amostra sofre durante a carbonização nessa faixa de temperatura, o que pode ser observado no presente trabalho nas carbonizações a 350°C. Assim como a tensão de ruptura tem suas variações com a temperatura final de carbonização, a resistência à compressão e a rigidez do carvão ocorrem o mesmo. Em um estudo realizado por Moore et al, (1974), utilizando madeira carbonizada de bétula, foi possível observar que houve um significativo aumento do módulo de elasticidade em temperaturas acima de 500 °C, além de uma queda considerável em temperaturas abaixo de 400 °C.

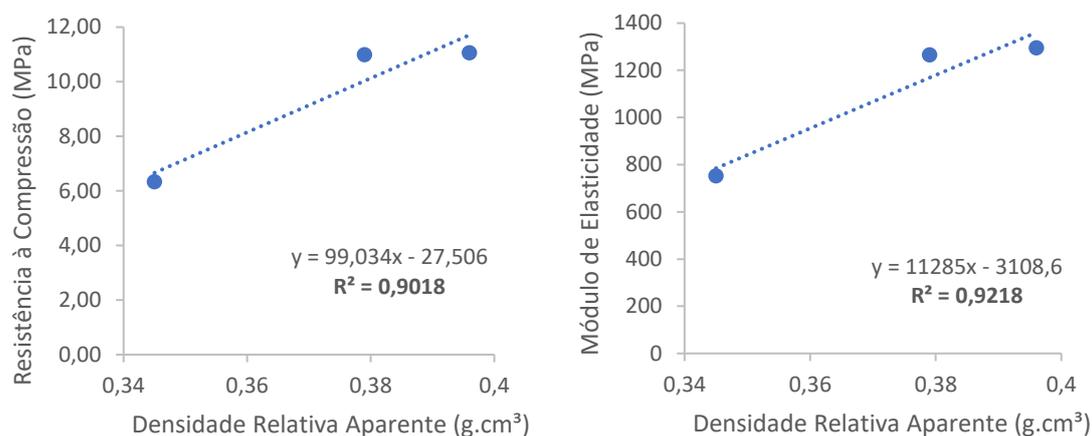
Gráfico 4: Relação entre a temperatura final de carbonização e a resistência a compressão e ao módulo de elasticidade do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*.



Fonte: O autor, 2021

A densidade relativa aparente pode ter relação diretamente proporcional a resistência do carvão vegetal estudado, fato esse, comprovado através da determinação do coeficiente de correlação de Pearson (R^2), que resultou no valor de $R^2=0,90$ para a compressão paralela às fibras e $R^2= 0,92$ para o módulo de elasticidade (Gráfico 6), indicando uma alta correlação linear, ou seja, esse resultado indica que carvões mais densos, para espécie *Hovenia dulcis*, são mais resistentes à ensaios mecânicos. Veiga et al. (2018) relacionaram a densidade aparente com a resistência a compressão e estudos de elasticidade em diversas espécies e obtiveram um coeficiente de correlação de 0,63 e 0,58, respectivamente, Armstrong et. al (1984) alcançaram um valor aproximado de 0,80 utilizando espécies nativas. Isto significa que, espécies mais densas apresentavam valores mais altos de resistência, podendo ser representados por uma correlação linear.

Gráfico 5: Relação entre a densidade relativa aparente e a resistência a compressão e ao módulo de elasticidade do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*.



Fonte: O autor, 2021.

Em um comparativo com o estudo realizado por Costa (2016), na qual desempenhou um trabalho similar com carvão vegetal oriundo do cruzamento de *Corymbia citriodora* com *Corymbia torelliana*, o autor obteve valores superiores em todas as marchas de carbonização quando comparado a este estudo, sendo em média um aumento de 41,42% no MOE e 214,98% de RC para a macha 1 (350 °C), 3,50% no MOE e 79,34% de RC para a macha 2 (450 °C), 2,58% no MOE e 57% de RC para a macha 3 (550 °C). Nas temperaturas de 450 °C e 550 °C que são temperaturas consideradas usuais para a produção de carvão vegetal, foram observados valores aproximados no módulo de elasticidade do carvão vegetal.

Uma abordagem de resistência do carvão vegetal através da metodologia de compressão das fibras possui um grande potencial para fornecer informações

relacionadas a resistência mecânica da espécie para produção de carvão vegetal, de um controle de qualidade e ganhos em produtividade. Entretanto, devido o carvão vegetal apresentar características heterogênicas e friáveis em suas estruturas, alguns entaves foram encontrados durante o presente trabalho. Mesmo tendo uma metodologia criteriosa no momento da preparação dos corpos de prova, houve rachaduras e defeitos internos, influenciando na heterogeneidade de resultados obtidos individualmente dentro de uma mesma marcha. Desta maneira, é interessante a utilização de um equipamento que facilite na visualização da estrutura interna da amostra, visto que nem sempre é possível analisar os defeitos a olho nu. Além disso, a utilização de um equipamento que possibilite o recorte da amostra de forma padronizada pois no momento em que se aplica a força de compressão na peça que possui estrutura irregular a tendência é que o pico de pressão seja aplicado na face irregular dando a falsa noção de resistência da amostra.

As propriedades mecânicas do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*, são inferiores às espécies amplamente difundidas no setor energético como eucalipto e acácia negra. Porém, é interessante que estudos mais aprofundados sobre a utilização da espécie sejam realizados, visto que se trata de uma pioneira, de rápido crescimento e fácil condução.

6. CONCLUSÃO

A marcha de carbonização 2, com temperatura final de 450 °C apresentou a maior resistência a compressão paralela às fibras (RC) e ao módulo de elasticidade (MOE). Além disso, foi possível constatar através da correlação de Pearson que as marchas de carbonização tiveram influência direta e positiva sobre os valores obtidos nos ensaios mecânicos, tendo uma correlação média de 0,91 (R^2), assim sendo de grande importância para determinação da qualidade final do carvão vegetal.

A densidade aparente média do carvão vegetal foi de 0,37 g.cm³, valor próximo aos de madeiras já utilizadas na produção de carvão vegetal, o que indica a possibilidade de uso neste segmento.

A correlação de Pearson demonstrou uma relação significativamente positiva entre a densidade relativa e a resistência mecânica do carvão vegetal, demonstrando de forma clara que, quanto maior for a densidade relativa aparente do carvão vegetal de *Hovenia dulcis*, maior será a resistência a compressão paralela às fibras (RC) e o módulo de elasticidade (MOE). Sendo assim, a melhor marcha de carbonização foi a 2 para a espécie de *Hovenia dulcis*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7416: **carvão vegetal: determinação do índice de quebra e abrasão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1985a. 4 p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Florestas energéticas no Brasil: demandas e potencialidades**. Belo Horizonte: AMS, 2009. Disponível em: http://silviminas.com.br/wp-content/uploads/2012/12/publicacao_585.pdf. Acesso em: 28 abril. 2018

ANDRADE, A. M. de & DELLA LUCIA, R. M. **Avaliação da higroscopicidade do carvão vegetal e de seus efeitos na resistência ao esmagamento**. Revista Floresta e Ambiente. Ano 2. 1995.

ANUÁRIO Estatístico da ABRAF 2012: ano base 2011. Brasília, DF, 2012.

ASSIS, M. R. **Study of the variability of mechanical and physical properties of charcoal obtained under different pyrolysis conditions**. 2016. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

AGRONEGÓCIOS e tecnologias. Gazeta Mercantil, 24maio 2006, p. A-3

ARMSTRONG, J. P.; SKAAR, C.; DEZEEUW, C. **The effect of specific gravity on several mechanical properties of some world woods**. Wood science and technology, v. 18, n. 2, p. 137-146, 1984.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 162 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional 1996**. Brasília: MME, 1996. 150p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2006: ano base 2005**. EPE, Rio de Janeiro 2006.

BHATTACHARYA, S. (2002). **Biomass energy and densification: A Global Review with Emphasis on Developing Countries**, Proceedings of The First World Conference on Pellets: 1 - 17.

BLANKENHORN, P. R.; JENKINS, G. M.; KLINE, D. E. **Dynamic mechanical properties and microstructure of some carbonized hardwoods**. Wood and Fiber, Lawrence, v. 4, n. 3, p. 212-224, Jan. 1972.

BRITO, J. O. **O uso energético da madeira**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” (Esalq/USP), Piracicaba (SP). 2007.

BRITO, J.O. **O Carvão vegetal no Brasil: gestões econômicas e ambientais**. São Paulo, v.4, n.9, p. 221-227, 1990 a.

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

BRITO J.O, BARICHELO L.E. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. Densidade da madeira x densidade do carvão**. IPEF. 1980;(20): p. 101-113.

CARVALHO, P. E. R. **Ecologia, silvicultura e usos da Uva-do-Japão**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, 1994. 24p

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. Brasília: CGEE, 2015. 150 p.

CETEC, FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte, v. 1, 1981.

MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, JB de. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**. Produção e utilização do carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, p. 75-89, 1982.

COUTO, A. M. et al. **Qualidade do carvão vegetal de Eucalyptus e Corymbia produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização**. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, dez. 2015.

COZZO, D. **Tecnologia de la forestación en Argentina y America Latina**. Buenos Aires: Editorial Hemisferio Sur, 1976. p.599.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA,. Disponível em:<
http://epe.gov.br/sitespt/publicacoesdadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-81/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf
>. Acesso em, v. 14, 2018.

EPE (2020). Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético anual**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso: 19/04/2021.

FIGUEIREDO, C.K.D. **Análise estatística do efeito da pressão na carbonização da madeira de Eucalyptus grandis**. 104f.. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JUNIOR, José Alexandre. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FREDERICO, P.G.U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 73 f.. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2009

FRIZZO, S.M.B.; SILVA, M.C.M.; BÔAS, E.R.V. **Balanco analítico da madeira de *Hovenia dulcis* Thunb., proveniente de um povoamento da Estação Experimental**

de Silvicultura de Boca do Monte - Santa Maria - Rio Grande do Sul. Silvicultura, São Paulo, v.8, n.28, p.799-801, 1983.

GOMES, M.T.M. **Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsa de mercadorias**. 71 f.. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2006.

GOMES, P. A., OLIVEIRA, J. B. **Teoria da carbonização da madeira**. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 27-42.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Anuário estatístico da IBÁ: ano base 2014**. Brasília: IBÁ, 2015. 80 p

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Anuário estatístico da IBÁ: ano base 2019**. Brasília: IBÁ, 2020.

IBGE (2019). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística **Pesquisa da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS)**. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2018_v33_informativo.pdf Acesso em: 19/04/2021

IBGE (2016). **Pesquisa da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS)**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/pesquisas/pevs/default.asp?o=27&i=P> Acesso em: 01/05/2018

IBGE (2010). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/english/estatistica/economia/pevs/2010/comentario.pdf> Acesso em: 02/05/2018

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, Censo Demográfico 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 22/05/2018

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Tabela 289 - **Quantidade produzida na extração vegetal por tipo de produto extrativo**. Disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&c=289>. Acesso em 22/04/2018.

IAPAR. **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2009. 49p.

JUNG, P. H.; BERTOLINI, I.C.; LUDVICHAK, A. A.; BIZ, S.; BRUN, E. J. **Planejamento da trilha ecológica interpretativa da UTFPR - Câmpus Dois Vizinhos**. In: 2º Seminário de Extensão e Inovação da UTFPR - SEI, 2012, Curitiba. 2º Seminário de Extensão e Inovação da UTFPR - SEI. Curitiba: UTFPR, 2012.

KURAUCHI, M. H. N. **Uma abordagem de ensaio de resistência mecânica de carvão vegetal**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2014.

LIMA, C. R. de & BAJAY, S. V. - **A reposição florestal obrigatória e o planejamento energético regional.** Revista Baiana de Tecnologia -TECBAHIA. EDITEC, Camaçari, 2000

MATOS, M.; RIOS, C. A. **Reatividade do carvão vegetal.** In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 91-112.

MONTEIRO, M.D.A. **Em busca de carvão vegetal barato: o deslocamento de siderúrgicas para a Amazônia.** Novos Caderno NAEA- Núcleo de Altos Estudos da Amazônia, Belém, v. 9, n. 2, p. 55-97, dez. 2006.

MOORE, G. R., BLANKENHORN, P. R., BEALL, F. C., & KLINE, D. E. (1974). **Some physical properties of birch carbonized in a nitrogen atmosphere.** Wood and Fiber, Madison, v. 6, n. 3, p. 193-199, 1974.

MOTA, F. C. MENEZ. **Análise da cadeia produtiva do carvão vegetal oriundo de Eucalyptus sp. no Brasil.** 2013. 169 f., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)—Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

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 a produção de carvão vegetal.** Pesquisa florestal brasileira, Colombo, PR, v. 31, n. 68, p. 319-330, out./dez. 2013.

OLIVEIRA, JB de; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P. A. **Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos.** Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC, p. 60-73, 1982.

OLIVEIRA J. B, GOMES P. A, de ALMEIDA M. R. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade.** In Produção e Utilização de Carvão Vegetal/Curso e exposição de fornos de carbonização; 1982; Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. p. 65-102.

OLIVEIRA, R.L.M.D. **Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal.** 111 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

PEREIRA, J.C.; SCHAITZA, E.G.; BAGGIO, A.J. **Propriedades física e químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de Grevillea robusta.** Circular Técnica, Embrapa Florestas, Colombo, 2000.

PINHEIRO, P. C. C. et al. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática.** Belo Horizonte, 2006.

PIGOZZO, J.C. **Influência da Umidade e da Densidade na Resistência à Compressão da Madeira.** São Carlos, 1982. 141p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

REZENDE, M. E. **Produção de carvão vegetal – importância do conhecimento fundamental.** Belo Horizonte, 2006. Curso: Fundamentos e práticas da carbonização da

biomassa, ministrado durante o Seminário: Prática, logística, gerenciamento e estratégias para o sucesso da conversão da matéria lenhosa em carvão vegetal para uso na metalurgia e indústria.

REZENDE, J. B.; SANTOS, A. C. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades**. Viçosa: EPAMIG, 2010. 80 p. (Boletim Técnico, 95).

SALLA, V. P.; BERTOLDO, G.; LIMA, D. **Integração sócioambiental na Trilha Ecológica Da Utfpr-Campus Dois Vizinhos**. In: XIII Encontro Paranaense de Educação Ambiental, Ponta Grossa, PR, 2011. Anais... Ponta Grossa, PR, 2011. Disponível em: <<http://eventos.uepg.br/epea/>>. Acesso em: 10 Mai. 2021.

SAMPAIO, R.S. **Conversão da biomassa em carvão vegetal. Situação Atual com Tendências 2025**. CGEE- Centro De Gestão e Estudos Estratégicos. Belo Horizonte, 2008. 14 p.

SILVA, J.C **CARVÃO VEGETAL: o eucalipto na indústria de carvão vegetal**. Revista da Madeira, v.13, n.75, 2003.

SILVA, A. M. N.; ALBUQUERQUE, J. L.; SILVA, E. S.; SANTOS FILHO, D.; BARBOSA, W. D. **A biomassa florestal (lenha) como insumo energético para os artesãos da cidade de Tracunhaém/PE**. Custos e @gronegocioonline- v. 4, n. 3

SINDIFER – Sindicato da Indústria de Ferro no Estado de Minas Gerais. Anuário 2019. Disponível em: http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario_2019.pdf. Acesso em 10 maio 2021

SHAFIZADEH F. **The chemistry of pyrolysis and combustion**. In Rowell R, editor. The chemistry of solid wood. Washington: American Chemical Society; 1984. p. 489-529.

SIMIONI, F. J., MOREIRA, J. M. M. Á. P., FACHINELLO, A. L., BUSCHINELLI, C. C. D. A., & MATSUURA, M. I. D. S. F.. **Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 731-742, abr.-jun., 2017

SOARES FILHO, S.; OVEREND, R.; MACEDO, I.; COUTO, L.; FREITAS, M. **Sustentabilidade na geração e uso de energia no Brasil: os próximos 20 anos**.

SOARES T. S.; CARNEIRO A. C. O.; GONÇALVES E. O.; LELLES J.G., 2006. **Uso da Biomassa Florestal na Geração de Energia**; ISSN 1678 – 3867, nº 8, ano IV

STILLNER, F.J.; AMARAL, H.R.B. do.; PEDROSO, O.; TREVISAN, R. **Estudo sobre a madeira da uva-do-japão (*Hovenia dulcis* Thunb.)**. Roesslária, Porto Alegre, v.5, n.2, p.361-370, 1983.

TREUSCH O, HOFENAUER A, TRÖGER F, FROMM J, WEGENER G. **Basic properties of specific wood-based materials carbonised in a nitrogen atmosphere**. Wood Science and Technology. 2004;(38): p. 323-333.

TRUGILHO, P.F. LIMA JT, MORI FA, LINO AL. **Avaliação de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal.** Cerne 2001; 7(2): 104-114

UHLIG, A. **Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para a estimação do consumo.** 2008. 156 f. Tese (Doutorado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

VEIGA, T. R. L. A., LIMA, J. T., MONTEIRO, T. C., ROCHA, M. F. V., de JESUS, M. S., & GOULART, S. L. **Efeito do comprimento do corpo de prova nas propriedades mecânicas do carvão de Eucalyptus.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 36, n. 88, p, 2016.

VEIGA, T. R. L. A., LIMA, J. T., MONTEIRO, T. C., DESSIMONI, A. L. A., & ROCHA, M. F. V. **Propriedades mecânicas de amostras individualizadas da madeira e do carvão de Eucalyptus urophylla e de Corymbia citriodora.** Scientias Forestalis, 46(117), 107-114 p, 2018.

VITAL, M.H.F.; PINTO, M.A.C. **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil.** BNDS setorial 30, p. 237-297. 2011.