

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA

BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Fernanda Aparecida Nazário de Carvalho

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA USO NA
SIDERURGIA**

São João Evangelista

2023

FERNANDA APARECIDA NAZÁRIO DE CARVALHO

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA USO NA
SIDERURGIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do
Instituto Federal de Minas Gerais - Campus São
João Evangelista para obtenção do grau de
bacharela em Engenharia Florestal.

Orientadora: Caroline Junqueira Sartori

Coorientadora: Gabriela Fontes Mayrinck
Cupertino

São João Evangelista

2023

REDE DE BIBLIOTECAS

FICHA CATALOGRÁFICA PARA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

C331e Carvalho, Fernanda Aparecida Nazário.

Estudo das propriedades do carvão vegetal para uso na siderurgia. /
Fernanda Aparecida Nazário Carvalho. – 2022.

27f.: il.

Orientadora: Dra, Caroline Junqueira Satoni.

Coorientadora: Me. Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia
Florestal – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2022.

1. Biomassa. 2. Combustíveis renováveis. 3. Sustentabilidade.
I. Carvalho, Fernanda Aparecida Nazário. II. Instituto Federal de Minas
Gerais *Campus* São João Evangelista. III. Título.

CDD 662.7

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

Fernanda Aparecida Nazário De Carvalho

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL PARA USO NA
SIDERURGIA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso Bacharelado em
Engenharia Florestal do Instituto Federal
de Minas Gerais - Campus São João
Evangelista para obtenção do grau de
bacharela em Engenharia Florestal.

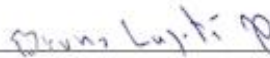
Aprovado em: 16 / 01 / 2023 pela banca examinadora:



Prof. Dra. Caroline Junqueira Sartori - IFMG (Orientadora)



Ma. Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino – UFES (Coorientadora)



Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá - IFMG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus amados pais,
Animadel e Rosa, meus maiores incentivadores
e exemplo de amor, simplicidade e resiliência.

AGRADECIMENTOS

“O Senhor Deus é minha força, ele fará os meus pés como os da corça, e me fará andar sobre lugares altos” Habacuque 3:19

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pela força que sustentou meus passos até aqui. Obrigada pelas provações, no qual pude testar a resiliência e os meus valores. Agradeço a Nossa Senhora Aparecida, minha companheira de jornada. Sei que por onde eu passar, a senhora estará.

Agradeço aos meus pais que independente de qual situação se encontravam, foram amparo físico e afetivo para minha mente e coração. É um trabalho tão árduo quando o meu e definitivamente em tempo integral. Vocês são além do que se espera da maternidade e paternidade. São exemplo incansável de força e superação. Sei que, se um dia o mundo estiver contra mim e eu tiver vocês dois, eu estarei a salvo.

À minha vózinha Geraldina (*in memorian*), que tanto se orgulhava por eu ter mudado o roteiro já pré-escrito para mim e para as mulheres da família. Aquela cadeira, à mesa da celebração de formatura, sempre estará reservada a senhora.

Aos meus professores, que fomentaram em mim o interesse pela busca do conhecimento. Sem o ensinamento de vocês, eu jamais chegaria até aqui. Aos meus orientadores (Natália Risso, Bruno Lafetá, Ivan Fontan, Tamíres Partteli, Carol Sartori, Gabi Mayrinck e Ananias Dias), serei eternamente grata pelo tempo cedido para me ensinar, levo na bagagem o que me passaram e o que são para mim! Que um dia eu seja vista por meus alunos, como vejo vocês! Se este dia chegar, serei profissionalmente realizada.

Aos meus amigos, meus maiores fomentadores de boas memórias, choros pós prova, risos pós aprovação, madrugadas em claro, ombro amigo em dias difíceis e fonte inesgotável de aprendizado, serei eternamente grata pelo que vivemos.

Agradeço à essa instituição por ser casa e fonte inesgotável de aprimoramento pessoal e profissional.

Agradeço ao Laboratório de Energia da Biomassa da UFES e seus demais membros, pela parceria e pelos ensinamentos.

EPÍGRAFE

“A casa grande surta quando a senzala aprende
a ler.”

Totonho

RESUMO

A usabilidade dos combustíveis fósseis intensivamente, faz com que surja a necessidade da busca pelo aprimoramento de técnicas que torne a transição energética uma realidade global. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade dos carvões vegetais de diferentes clones comerciais para uso na siderurgia. Para este estudo foram utilizadas três amostras de carvão sendo os clones CV1528, CV144 e CV7, e para fins comparativos, utilizou-se o coque mineral e o coque de calcinato de petróleo. Foram realizadas as análises de densidade a granel, densidade aparente, as quais se obtiveram as médias de porosidade. A análise imediata para determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo, poder calorífico, densidade energética, ensaio de reatividade, verificação da resistência pós reação e microscopia eletrônica de varredura. Foram observados maiores desempenhos energéticos do ensaio de densidade a granel pelo carvão vegetal do clone 144 que apresentou média de $0,097 \text{ g/cm}^3$, a densidade aparente teve média de $0,340 \text{ g/cm}^3$. Esse carvão vegetal, ainda apresentou melhor desempenho em relação à média de umidade com $4,309\%$, em relação ao carbono fixo com $75,86\%$ e apresentando poder calorífico superior aos demais. Dos ensaios de reatividade e resistência, o carvão vegetal do clone 1528 é o que se destacou pela menor reatividade e conseqüentemente menor friabilidade. Nesse sentido, tem-se o carvão vegetal mostrou boa eficiência energética na maior parte das análises realizadas neste trabalho. Apresentando boas características físicas e químicas, parâmetros tais, de grande importância para a utilização na siderurgia. É necessário ainda, aprimorar e padronizar técnicas de carbonização e de tratamentos silviculturais, que evidenciem as propriedades dos carvões vegetais.

Palavras-chave: Biomassa. Combustíveis Renováveis. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The intensive usability of fossil fuels raises the need to search for the improvement of techniques that make the energy transition a global reality. This work aims to evaluate the quality of charcoal from different commercial clones for use in the steel industry. For this study, three charcoal samples were used, clones CV1528, CV144 and CV7, and for comparative purposes, mineral coke and petroleum calcinate coke were used. Bulk density and apparent density analyzes were carried out, from which porosity averages were obtained. Immediate analysis to determine moisture content, volatile materials, ash, fixed carbon, calorific value, energy density, reactivity test, verification of post-reaction resistance and scanning electron microscopy. Higher energy performances were observed in the bulk density test for the charcoal of clone 144, which averaged 0.097 g/cm^3 , the apparent density had an average of 0.340 g/cm^3 . This charcoal still showed better performance in relation to the average moisture with 4.309%, in relation to fixed carbon with 75.86% and presenting a higher calorific value than the others. From the reactivity and resistance tests, charcoal clone 1528 stood out for its lower reactivity and consequently lower friability. In this sense, charcoal has shown good energy efficiency in most of the analyzes carried out in this work. Presenting good physical and chemical characteristics, such parameters, of great importance for use in the steel industry. It is still necessary to improve and standardize carbonization techniques and silvicultural treatments, which show the properties of charcoal.

Palavras-chave: Biomass. Renewable Fuels. Sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Indústria siderúrgica	12
2.2 Carvão vegetal e aço verde	12
2.3 Qualidade do termorreduzidor	13
3 MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Caracterização físico-química dos materiais	14
3.2 Análise visual do carvão por meio da microscopia eletrônica de varredura (mev) ..	15
3.2 Determinação do índice de reatividade do carvão (CRI) e da resistência após a reatividade do carvão vegetal (CSR)	15
3.3 ANÁLISE DOS DADOS	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1 Características físico-química dos materiais.....	18
4.2 Potencial energético do carvão vegetal para siderurgia.....	23
4.4 Análise visual do carvão por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV)	26
4.4 Comportamento do carvão vegetal frente aos ensaios de reatividade e abrasão.....	27
5 CONCLUSÃO.....	30
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1 INTRODUÇÃO

O aço está presente na vida das pessoas de forma tão efetiva, que se tornou difícil imaginar o mundo sem ele. Diariamente, nos deparamos com o aço nos utensílios domésticos, nos eletrônicos, nos diversos veículos utilizados para a locomoção, nas redes de energia elétrica e em vários itens de utilidade. Isso torna a indústria siderúrgica, que é responsável pela produção dessa matéria prima, uma importante geradora de insumos para os múltiplos setores da indústria de transformação, contribuindo de forma positiva para a economia (CHAVES; OLIVEIRA, 2020; VIANA et al., 2019).

O setor siderúrgico mundial tem crescido gradativamente em suas operações, sendo responsável pela produção de cerca de 1,95 bilhões de toneladas de aço bruto, como no ano de 2021. Já na América Latina, o Brasil ocupa a 1ª posição em termos de produtividade de aço, com 55,3% do total (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022). Isso coloca a siderurgia na posição de principal seguimento no ramo metalúrgico. Nesse sentido, para que esse setor consiga gerar produtos, tradicionalmente é bem consolidada a prática de extração dos metais de minérios, que participarão das etapas do processo produtivo do ferro-gusa e do aço (RESENDE; PINTO; BÊNIA, 2022).

Nessas etapas, para a formação dessa liga metálica que origina o aço, é necessário a utilização de termorreductores de qualidade, como originados do carvão mineral ou carvão de pedra. O carvão mineral consiste em uma rocha sedimentar escura, constituída por uma mistura de componentes orgânicos variáveis e fossilizados no decorrer de milhões de anos, que tem em sua composição o oxigênio, enxofre, hidrogênio e o principal constituinte para a formação da liga metálica: o carbono (MARCOS et al., 2020).

O carvão mineral é responsável por dar origem ao coque por meio de um processo denominado coqueificação. Neste processo o carvão mineral é submetido a um tratamento térmico sem a presença de oxigênio, que resulta entre outros produtos, em um sólido poroso abundante em carbono – o coque (CASTRO, 2011). Na indústria siderúrgica, o coque atua como fonte de gás para que o minério de ferro seja reduzido, cumprindo importante papel de fornecedor de carbono (LI et al., 2014; MOURÃO, 2011).

Em contrapartida, o uso do carvão mineral vem trazendo uma série de debates nas áreas da saúde e ambiente, enviados pelos problemas de sua utilização. A queima do carvão mineral é capaz de produzir uma reação exotérmica que libera gases e metais pesados ao meio, contribuindo intensamente para a crise climática (AMSTER; LEVY, 2019). Pode-se considerar

que a sua utilização nas indústrias de transformação, vem contribuindo com as emissões de GEEs (Gases do Efeito Estufa), o que gera discussões sobre a eficiência da utilização de bioprodutos como uma solução para a produção de energia renovável (MARCOS et al., 2020).

Uma alternativa utilizada na indústria siderúrgica é o carvão vegetal, proveniente de florestas energéticas. As condições do solo, clima e ambiente no Brasil são favoráveis para que a silvicultura seja desenvolvida. Segundo o Relatório Anual da Indústria Brasileira de árvores (2022), a produção de carvão vegetal oriundo de florestas plantadas, coloca o Brasil como principal produtor dessa matéria mundialmente, seguido da Nigéria, Congo e Etiópia. Isso reforça a discussão sobre a o aprimoramento de técnicas e práticas sustentáveis que permitam que ocorra a transição energética segura, motivados pela emergência mundial, climática e planetária pela adesão de práticas com menor potencial poluidor ou práticas neutras de emissões. Podendo assim, o país pode investir em atividades florestais quando comparada a outros países, abrindo o diálogo acerca da participação no contexto da geração de energia renovável, na mesma amplitude (FORTALEZA et al., 2019).

Estudos sobre a implantação de culturas florestais para diferentes fins, aliados ao melhoramento genético de plantas, permite a seleção de árvores para formação de florestas com uma homogeneidade de características. A partir disso, tem-se a possibilidade de escolha de indivíduos fenotipicamente superiores e com elevados índices produtivos. Estes estudos, refletem na qualidade e nas propriedades do material a ser utilizado, seja celulose, madeira serrada e até mesmo o carvão vegetal. Selecionar clones que sejam geneticamente superiores garante que características a produção de carvão vegetal tenha seus padrões de tempo, qualidade e produtividade atingidos (PROTÁSIO et al., 2013).

Pensar na inserção e no incentivo da bioenergia em ampla escala, viabiliza também contribuições para que alguns itens da lista de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) possam ser colocadas em práticas. Isso promove a acessibilidade a fontes de energia seguras, úteis e verdes, oportunizando hábitos sustentáveis e contribuindo para o combate dos problemas climáticos (ONU, 2015). Já para o setor siderúrgico, tais ações, contribuem para o aprimoramento de técnicas que reduzam as emissões resultantes dos processos siderúrgicos a base de carvão mineral, produzindo energia limpa e aço-verde (BABICH; SENK, 2013) .

Tem-se poucos estudos sobre a qualidade e aprimoramento de técnicas de utilização do carvão vegetal na indústria siderúrgica e que sejam de domínio público. Deste modo, considerando que o setor de ferro-gusa e aço domina o segundo lugar no *ranking* de consumo de energia no Brasil, apresentando uma matriz energética ainda dependente de combustíveis

fósseis (CAMIOTO; FLÁVIA; DO NASCIMENTO REBELATTO, 2014), investigações científicas sobre as propriedades de produtos renováveis, como o carvão vegetal, são necessárias para a influência na tomada de decisões assertivas na escolha de um combustível. Pensando em sustentabilidade e inovação no setor de produção do ferro-gusa, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade dos carvões vegetais de diferentes clones comerciais para uso na siderurgia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

Após a revolução industrial, as atividades diárias tornaram-se impraticáveis sem o uso do aço, sendo a sua produção um sinal do desenvolvimento econômico de um país, sustentado pela necessidade da aderência de práticas inovadoras (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022). No ano de 2021, a indústria siderúrgica mundial em suas operações, alcançou a produção de 1,95 bilhões de toneladas de aço bruto, representando um aumento de 36% considerando a produção de 2010 (que foi equivalente a 1,43 bilhões de toneladas), possibilitando observar o desenvolvimento do setor ao longo da década (RESENDE; PINTO; BÊNIA, 2022). A indústria siderúrgica confere grandes atribuições na indústria de transformação, influenciando diretamente no Produto Interno Bruto (PIB) do país (VIANA, 2021). O setor de fabricação de aço e ferro, emprega grandes contribuições para o avanço da globalização, impactando positivamente na economia (MOUSA et al., 2016).

Segundo o (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022) o Brasil produziu cerca de 36,2 milhões de toneladas de aço bruto no ano de 2021. Na América Latina o Brasil foi também considerado o maior produtor de aço (alcançando o percentual de 49,3% da produção total de aço bruto), em seguida vem o México e Argentina, com 26 e 8,9% (INSTITUTO AÇO BRASIL – IABR, 2010). Isso ressalta a emergência da adoção de políticas de produção que visam reduzir os impactos ambientais, decorrentes do processo produtivo do aço (CHAVES; OLIVEIRA, 2020).

2.2 CARVÃO VEGETAL E AÇO VERDE

As condições do solo, clima e ambiente no Brasil são propícias para o desenvolvimento da silvicultura, podendo o país, investir em atividades florestais, quando relacionado a outros países e conseqüentemente abrindo o diálogo acerca da participação no contexto da geração de

energia renovável, na mesma amplitude (FORTALEZA et al., 2019). O que trazendo a possibilidade da substituição do coque mineral pelo carvão vegetal mitigando de forma considerável as emissões, resultantes dos processos siderúrgicos de produção de aço tradicionais, produzindo energia limpa e aço-verde (BABICH; SENK, 2013).

Segundo Brand (2010), os combustíveis aptos para a geração de energia devem ter algumas características essenciais, sendo o poder calorífico, uma das propriedades principais, ou seja, a quantidade de calor liberado na combustão. O processo de queima da madeira controlando as variáveis e intempéries é denominada pirólise. Esse processo é responsável por fixar o carbono como carvão vegetal, formando também subprodutos, na forma líquida (liquor pirolenhoso) e na forma gasosa (gases condensáveis).

Para a indústria siderúrgica, o uso do carvão vegetal pode ser um representante de vantagens em relação ao carvão mineral, devido ao seu baixo teor de cinzas e enxofre, que normalmente, tende a ter valores superiores quando tratamos do carvão mineral. A utilização de fontes alternativas a combustíveis de origem fósseis, é de grande necessidade para o futuro do desenvolvimento econômico e ambiental (SILVA et al., 2020).

O carvão vegetal no ciclo produtivo do aço desempenha papel de termorredutor, funciona nos alto-fornos como um potencial fornecedor de carbono e energia para reduzir o minério de ferro e atuando como uma estrutura importante de sustentação da carga de minério no ciclo produtivo do aço (FIGUEIRÓ et al., 2019). É ideal a busca por uma produção de carvão vegetal superior, com baixo teor de umidade e uma alta densidade energética com menor teor de umidade, assegurando baixa emissão de fumaça sendo um produto eficiente para uso comercial (OLIVEIRA et al., 2019).

2.3 QUALIDADE DO TERMORREDUTOR

Quando se trata de carvão vegetal, é importante ater-se a algumas demandas relacionadas à qualidade para o bom cumprimento de suas funções no alto-forno. Fatores como a granulometria, influenciam altamente na permeabilidade, da carga, quando dentro do alto-forno, sendo o tamanho do carvão vegetal o triplo do tamanho do minério, garantindo uma preparação mais eficaz da carga, para que assim ocorra maior vazão dos gases (BRITO, 1993).

Além disso, o carvão deve apresentar o seu teor de carbono fixo acima de 75%; seu teor de umidade deve ser inferior a 5%; poder calorífico acima de 7.400 kcal/kg; dimensões médias da partícula devem ser superiores a 40 mm e teor de cinzas inferior a 2%. É também necessário

que o termorreductor tenha boas resistências mecânicas, seja pouco friável, tenha baixo teor de finos e sem impurezas contendo densidade a granel superior a 0,25 t/m³.

A densidade do carvão vegetal é um fator primordial que merece destaque, devido a sua relação com a produtividade do alto-forno, ou seja, se maior a sua densidade, maior será o tempo da carga metálica no alto-forno, podendo prejudicar outras propriedades (DE CARVALHO, 2012). Outro fator importante é a propriedade mecânica do carvão. É necessário que o carvão seja resistente ao choque e a quebra. O carvão vegetal naturalmente é um produto bastante friável, acentuando ainda mais essas características, as técnicas empregadas no seu manuseio e transporte (BRITO, 1993).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O carvão vegetal e o carvão mineral utilizados para este experimento é proveniente de uma indústria siderúrgica de Minas Gerais. Os materiais utilizados para a realização das análises foram: Carvão vegetal proveniente do clone comercial 07 (CV07), carvão vegetal proveniente do clone comercial 144 (CV144) e o carvão vegetal proveniente do clone comercial 1528 (CV1528). Para fins de comparação, os coques minerais utilizados foram: Coque de calcinato de petróleo (CCP) e coque metalúrgico (CM). Os materiais utilizados nas análises foram homogeneizados e preparados de acordo com a especificidade das normas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS MATERIAIS

A densidade a granel foi determinada segundo a razão massa ocupada da amostra em um recipiente de volume pré-determinado, conforme a norma a DIN EM 15103 (2010). Já a densidade aparente, verdadeira e porosidade foi adaptada de acordo com a NBR 11941 (2003). A análise imediata, para determinação dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, seguiu os procedimentos descritos pela norma D 1762-84 (ASTM, 2013).

O poder calorífico superior, foi determinado em uma bomba calorimétrica adiabática modelo IKA C200, conforme metodologia do *Deutsches Institut Für Normung* 14918 (DIN, 2010b).

O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado conforme a Equação 1:

$$PCI = PCS - 600 * \left(\frac{9H}{100} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

PCI= poder calorífico inferior (Kcal/Kg); PCS = poder calorífico superior (Kcal/Kg); H = teor de hidrogênio (%).

O poder calorífico útil (PCU) será determinado conforme a Equação 2: $PCU = PCI \left\{ \frac{(100-U)}{100} \right\} - 6U$ (Equação 2)

Sendo:

PCU = poder calorífico útil (Kcal/Kg); PCI = poder calorífico inferior (Kcal/Kg); U = umidade em base úmida (%).

Para a obtenção da densidade energética foi considerada a multiplicação da densidade a granel pelo poder calorífico útil.

3.2 ANÁLISE VISUAL DO CARVÃO POR MEIO DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As amostras trituradas e homogeneizadas em peneira de 60 mesh (0,250 mm), utilizando as frações retidas na peneira de 60 mesh foram fixadas em suporte metálico com fita de carbono metalizadas com ouro em sistema Balzers Union SCD 030. Foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura JSM- IT200 (Tóquio, Japão), operando a 10Kv e as imagens SEM, com aproximação de x500, foram adquiridas usando o software proprietário JEOL. Os poros foram identificados.

3.2 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE REATIVIDADE DO CARVÃO (CRI) E DA RESISTÊNCIA APÓS A REATIVIDADE DO CARVÃO VEGETAL (CSR)

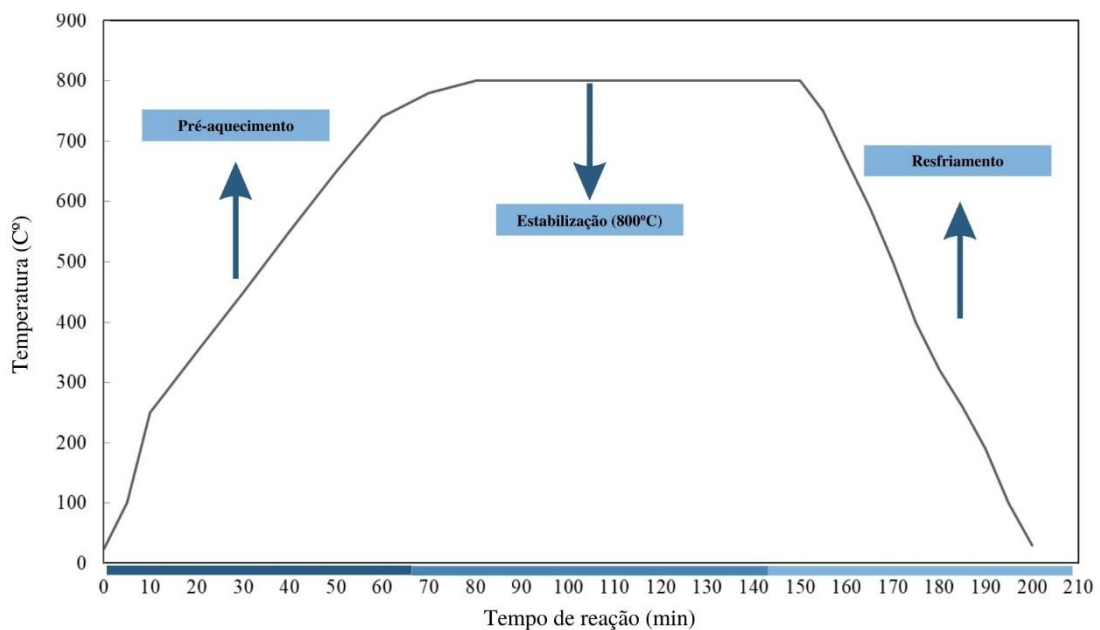
A reatividade do material foi determinada segundo a Norma ASTM 5341 (2019) - *Standard Test Method for Measuring Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength After Reaction (CSR)*. Foi utilizada uma amostra de 110 g de material com granulometria entre 19,0 e 22,4 mm, que foi submetida durante 2 horas a um fluxo de 5 Lmin⁻¹ de CO₂ em temperatura de 800°C, conforme a Figura 1. Posteriormente o material foi resfriado sob fluxo de nitrogênio, onde obteve-se ao final, a perda de massa da amostra devido à reação de *Boudouard* conforme

a figura 1. Deste modo o índice de reatividade (CRI) deu-se pela relação entre a perda de massa da amostra e sua massa inicial multiplicada por cem, segundo a equação 3, em que:

$$CRI = \left(\frac{m_0 - m_{f1}}{m_0} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

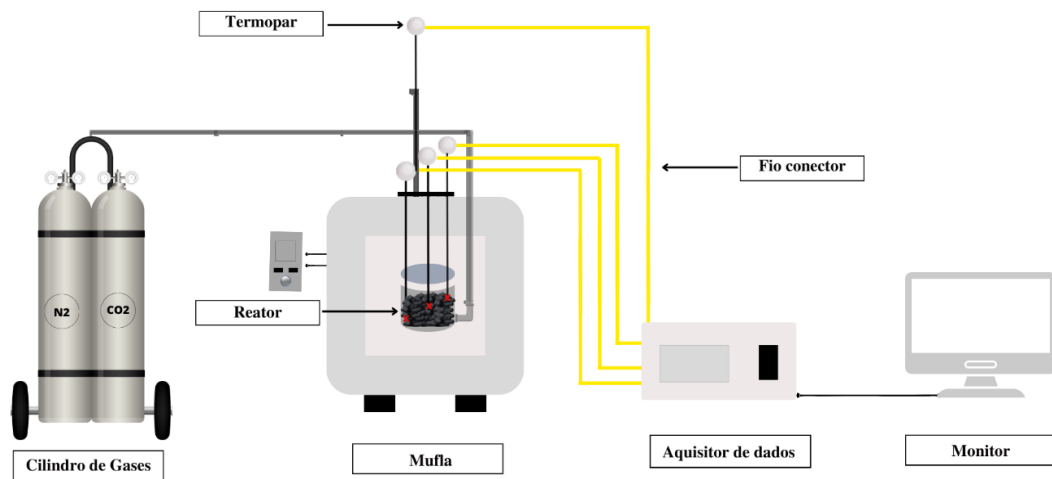
Em que: CRI = é o índice de reatividade do carvão vegetal (%); m_0 = massa antes da reação química (g); m_{f1} = massa após a reação química (g).

Figura 1: Curva de aquecimento.



Fonte: Elaborado pela autora.

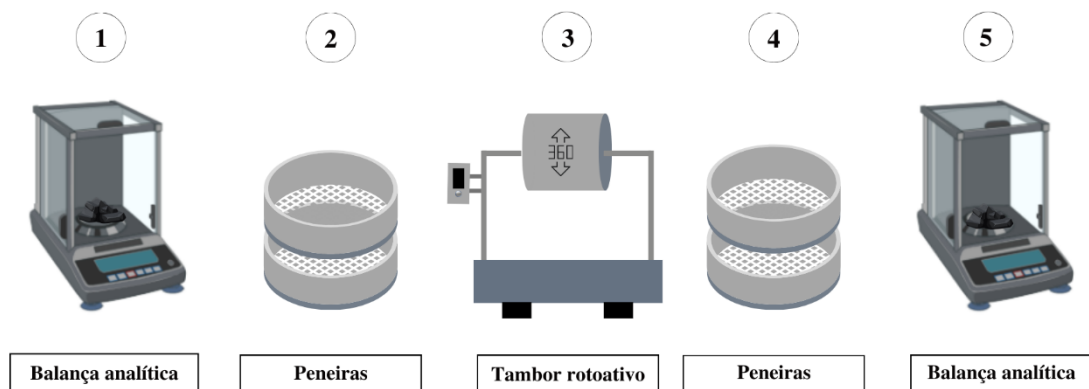
Figura 2: Esquema da análise de reatividade.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para avaliar a friabilidade do material após a reação (CSR), segundo os procedimentos estabelecidos na norma ASTM 5341 (2019), as amostras utilizadas no teste de reatividade foram submetidas a abrasão em um tambor rotativo durante 30 minutos. Após o teste o carvão vegetal e o coque passaram pelo peneiramento em malha de seção quadrada com dimensão de 9,5 mm (figura 2). O índice de resistência após reação (CSR) foi obtido através da relação entre a massa retida na peneira e a massa inicial antes do teste, multiplicada por cem.

Figura 3: Esquema da análise de resistência pós reação.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS

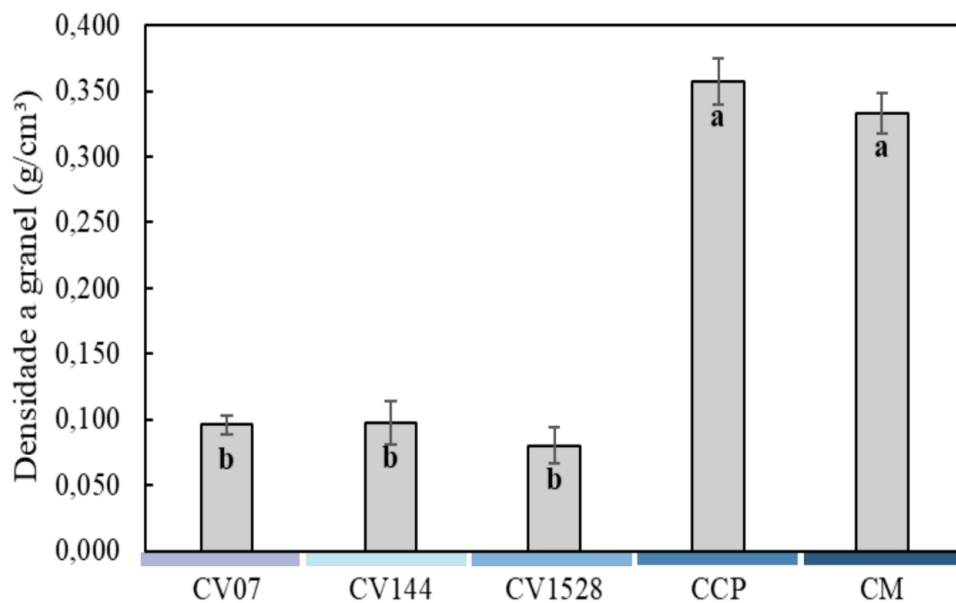
Os dados coletados foram submetidos à análise de variância (teste F) com auxílio do software R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018). Quando os dados foram significativos, foi empregado o teste de Tukey a 5% de significância, para fins de comparação de médias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICA DOS MATERIAS

Na Figura 4 é possível observar os resultados obtidos para o ensaio de densidade a granel.

Figura 4: Densidade à granel do carvão vegetal e coques mineral. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.



Fonte: Elaborado pela autora.

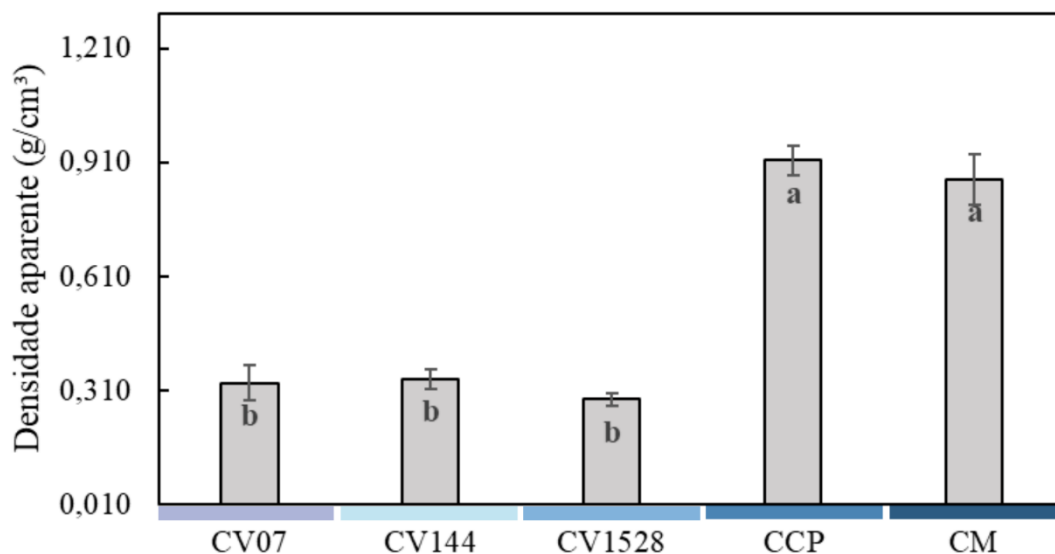
Para o ensaio de densidade a granel, observou-se que o CV07 apresentou densidade média de 0,96 g/cm³; o CV144 apresentou média de 0,097 g/cm³; enquanto o CV1528 apresentou média de 0,080 g/cm³, sendo estes valores estatisticamente iguais entre si. Logo, constata-se que as amostras de carvão vegetal testadas foram estatisticamente iguais, como mostrado na figura 4. Observa-se que os valores de densidade à granel do carvão vegetal quando comparado ao coque mineral é inferior. O CCP apresentou valor de média equivalente a 0,357

g/cm³, enquanto o coque metalúrgico apresentou valor equivalente a 0,333 g/cm³, sendo também estes valores estatisticamente iguais entre si pelo teste Tukey a 5% de significância.

Altos valores de densidade a granel é indicador positivo para armazenamento, utilização e transporte (BRAND, 2010). Quanto maior essa densidade, menor será o volume de material ocupado por uma mesma quantidade de massa (PERDIGÃO et al., 2015). A utilização de um carvão com valores de densidade a granel baixas, pode configurar na baixa produtividade dos fornos (ISBAEX, 2014).

Para a densidade aparente, é possível perceber na Figura 5, que os valores dos dois grupos estudados não diferem entre si, de modo significativo.

Figura 5: Densidade aparente do carvão vegetal e do coque mineral. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.



Fonte: Elaborado pela autora.

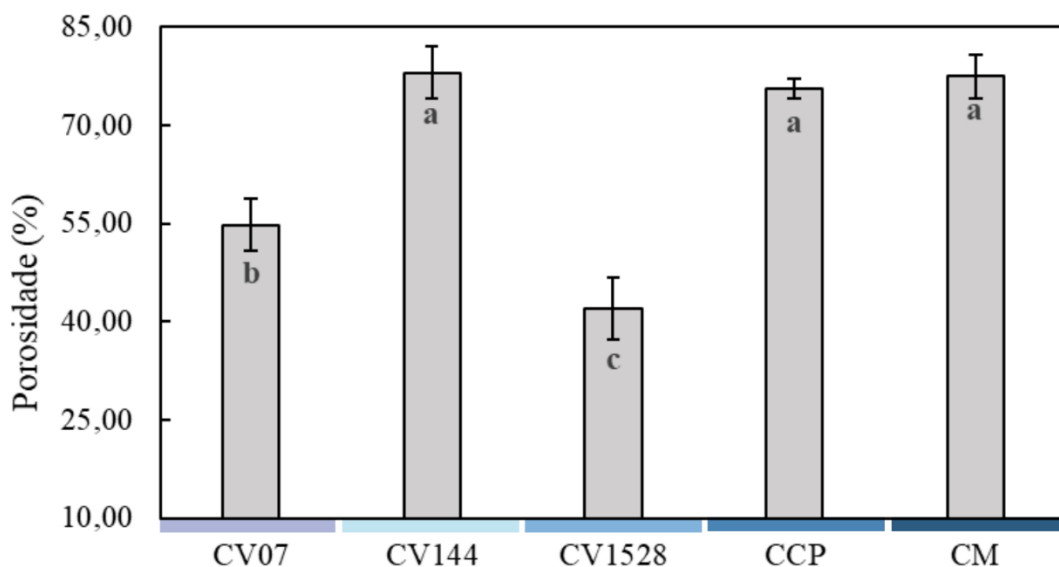
Para a densidade aparente, o CCP obteve médias de 0,915 g/cm³ mostrando-se superior ao CM que obteve 0,865 g/cm³, sendo estatisticamente iguais segundo o teste de significância de Tukey. As amostras de carvões vegetais foram estatisticamente iguais, sendo a amostra CV144, recebendo destaque pela maior média (0,340 g/cm³); seguida da amostra CV1528 (0,286 g/cm³) e a amostra CV07 (0,329 g/cm³).

Wallase et al. (2018), encontraram valores muito semelhantes para *Eucalyptus grandis* (0,343b), (*E. camaldulensis* x *E. grandis*) x *E. urophylla* (0,321b), *E. urophylla* x *E. grandis*

(0,371a). Os autores consideraram os valores encontrados para o material do clone de *E. urophylla* (Clone 144) como intermediários, quando comparado com o híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* que apresenta densidade maior (Clone 1528). Justificado que as variáveis sofrem influência do processo da análise e pela matéria-prima. Protásio *et al.*, (2013) ressaltaram em seu trabalho que quanto maior a densidade do carvão, maior será a sua resistência mecânica e maiores será o seu potencial para a indústria siderúrgica, se tratando do gênero *Eucalyptus* spp.

A porosidade, obtida por meio da relação entre a densidade verdadeira e a densidade aparente pode ser identificada na Figura 6, abaixo.

Figura 6: Valores médios de porosidade para os carvões vegetais e os coques minerais. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.



Fonte: Elaborado pela autora.

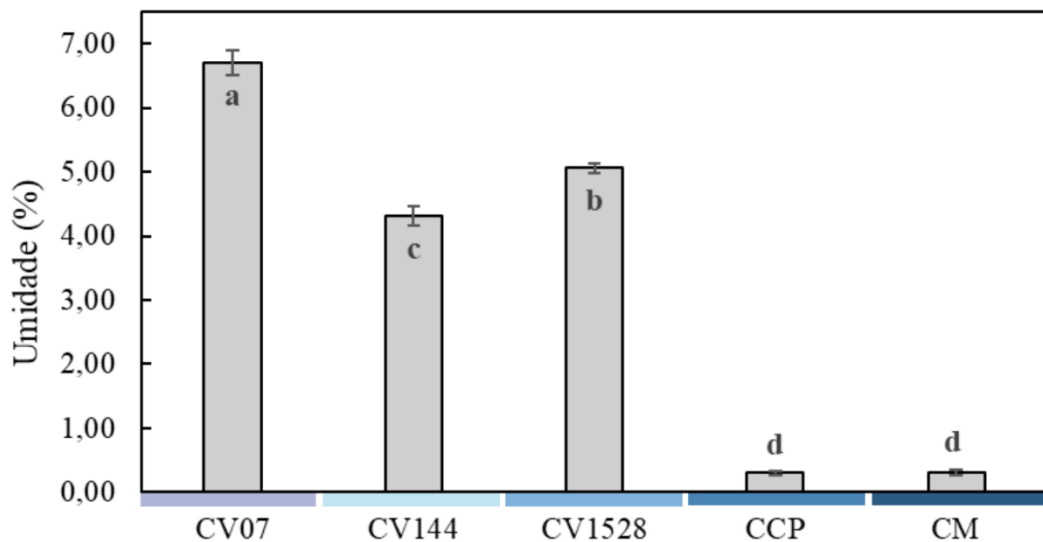
De acordo com os dados, pode ser observados os maiores valores de porosidade do carvão, apresentados pelas amostras do CV144 com 78% de média, o CM com 77,4% e o CCP apresentando 75,5%. superando os valores apresentados pelo CV07 com 54,75% de média, e pelo CV1528 com média de 42% (Figura 6).

Normalmente, o carvão vegetal tende a apresentar uma elevada porosidade, como os valores encontrados por Júnior *et al.* (2016). Os valores encontrados pelo autor, variaram de 66,74 a 76,23%. Sofrendo pouca variação, quando comparado aos valores encontrados neste trabalho. Para os clones, que foram estatisticamente diferentes, pode ser justificado pelos

diferentes materiais genéticos e composição química dos mesmos, influenciando o percentual de porosidade. Para os coques amostrados, não houve diferença significativa, sendo o coque metalúrgico, a amostra de maior média de porosidade. A alta porosidade do carvão não é bem-vista no contexto siderúrgico, tendo em vista que afeta negativamente no sentido de resistência mecânica (FRAGA, 2019).

Para o ensaio de umidade, as médias encontradas podem ser visualizadas na Figura 7.

Figura 7: Valores médios de umidade para os carvões vegetais e os coques minerais. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.



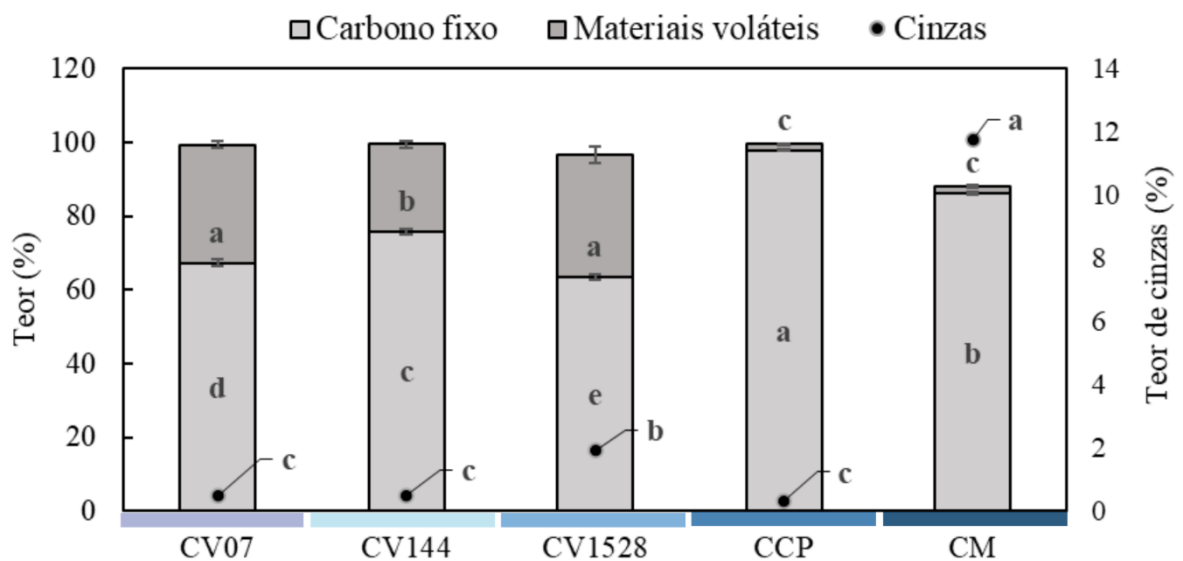
Fonte: Elaborado pela autora.

No ensaio de umidade observou-se que o CV144 apresentou melhor desempenho em relação à média de umidade (4,309%), tendo valor abaixo de 6%. (Figura 7) A amostra CV1528 (5,061%) vem em seguida e a amostra CV07 (6,696%) logo após (Figura 7). As amostras de carvão mineral apresentaram valores estatisticamente iguais, sendo o CCP (0,303%), tendo um desempenho mais expressivo, frente ao CM (0,38) (Figura 7).

Brand et al. (2015) encontrou valores maiores de umidade para clones de eucalipto, valores variando de 6,68% à 8,21%, o qual considerou elevados. Altos teores de umidade podem interferir na capacidade energética do carvão, em que quanto maior a umidade do carvão menor será o poder calorífico (COSTA, 2016). Para uso siderúrgico, é estipulado uma variação entre 1 a 6% no teor de umidade do carvão.

Seguindo as propriedades, na Figura 8, é possível visualizar o percentual médio de carbono fixo, cinzas e voláteis dos materiais em estudo

Figura 8: Percentual de carbono fixo, cinzas e voláteis. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Em termos de carbono fixo, todas as amostras são estatisticamente distintas. O CCP apresentou um valor mais expressivo de carbono fixo com 97,88%, seguido do CM com 86,26%. Com relação às propriedades do carvão vegetal das três espécies, o CV144 tem 75,86% de carbono fixo, sobressaindo frente ao CV07, com 67,38% e o CV1528, com 63,60% (Figura 8). O carbono fixo representa a fração do carvão que queima em estado sólido e isso faz com que aumente a estabilidade e a resistência térmica do combustível, assim, valores variando de 75% a 80% de carbono fixo são ideais para o contexto siderúrgico (GOMES, 2006; PROTÁSIO et al., 2013).

Chaves et al. (2013) encontraram para outros clones de eucalipto, valores de carbono variando de 74% a 79%. Segundo os autores, o poder calorífico apresenta relação direta com o

teor de carbono fixo, assim, deste modo, alto teor de carbono fixo implica em poderes caloríficos com valores elevados.

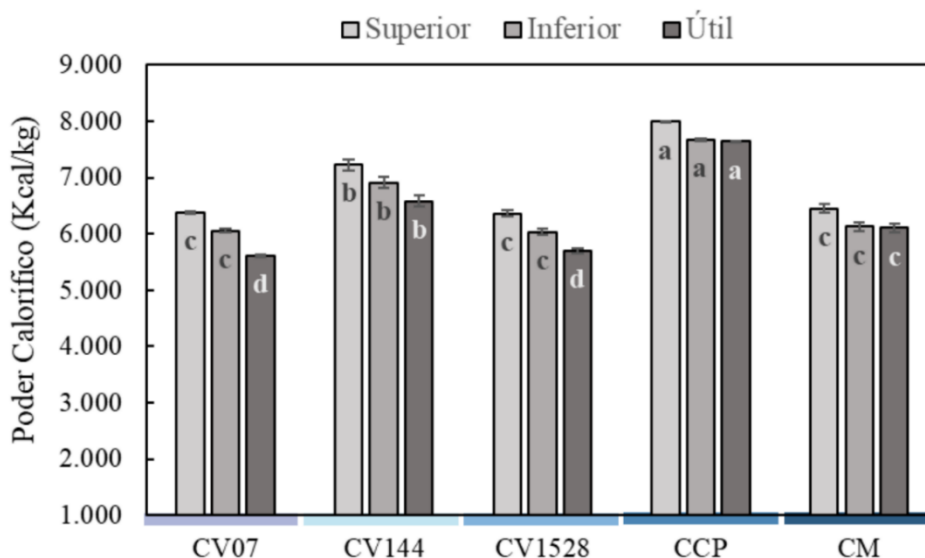
Em termos de quantidade de cinzas, o coque metalúrgico, apresenta valor expressivo, 11,75%, enquanto o CV1528 vem logo em seguida com 1,925%. O CV144 com 0,5%, CV07 com 0,487%, sendo a amostra de CCP com 0,334% (Figura 8). Como citado por Barbieri (2018), o coque de petróleo tem como grande benefício o seu baixo teor de cinzas, o tornando útil, em termos de produtividade, a sua utilização para misturas com carvões com alto teor de cinza. Sua particularidade, apesar do bom desempenho, é sua origem não renovável, o que expande a percepção para as opções renováveis como o carvão vegetal do CV07, segundo a Figura 8, que obteve melhor desempenho frente aos demais e o teor de cinzas do CV144, que vem se mostrando eficiente em relação as suas propriedades, em outras análises. O alto teor de cinzas, é prejudicial tanto no alto-forno quanto na Injeção de Carvão Pulverizado (ICP), pois elas consomem calor e ocupando um volume significativo dentro da partícula e do alto-forno (FROEHLICH; MOURA, 2014). Ressalta-se que no processo siderúrgico, as cinzas apresentam efeito catalizador na reação $C - CO_2$ atribuído à presença marcante de óxidos metálicos CaO, Fe_2O_3 , K_2O e MgO (CETEC, 1982).

Para o teor de voláteis, ficam em destaque os materiais provenientes dos carvões vegetais. O CV1528, apresentou 33,04% de voláteis, sendo estatisticamente igual ao CV07 com 31,99%. O CV144, teve 23,64% de materiais voláteis (Figura 8). As amostras CM e CCP, obtiveram os valores de 1,81% e 1,78% respectivamente. Grandes valores de materiais voláteis, exercem influência inversa sobre no percentual de carbono fixo, logo, não são ideais para os parâmetros de qualidade (BARBIERI, 2018).

4.2 POTENCIAL ENERGÉTICO DO CARVÃO VEGETAL PARA SIDERURGIA

A Figura 9 mostra os teores de poder calorífico superior, inferior e útil das amostras analisadas.

Figura 9: Análise de poder calorífico. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise possibilitou conhecer que o poder calorífico superior, inferior e útil. Para o poder calorífico superior, as amostras CV07 ($6.381,32 \text{ kcal.kg}^{-1}$), CV1528 ($6.359,27 \text{ kcal.kg}^{-1}$) e o CM ($6.452,58 \text{ kcal.kg}^{-1}$), não apresentaram diferença significativa. No entanto, os valores de poder calorífico superior, para os tratamentos do CCP ($7.993,33 \text{ kcal.kg}^{-1}$) e o CV144 ($7.231,89 \text{ kcal.kg}^{-1}$), mesmo estatisticamente diferentes, foram significativamente superior aos demais (Figura 9). Soares et al. (2015) encontraram para suas amostras de carvão vegetal, valores entre $6.684 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e $7.501 \text{ kcal.kg}^{-1}$ e observou que o PCS tem valores ligeiramente aumentados em função da idade, que neste caso, não é conhecido.

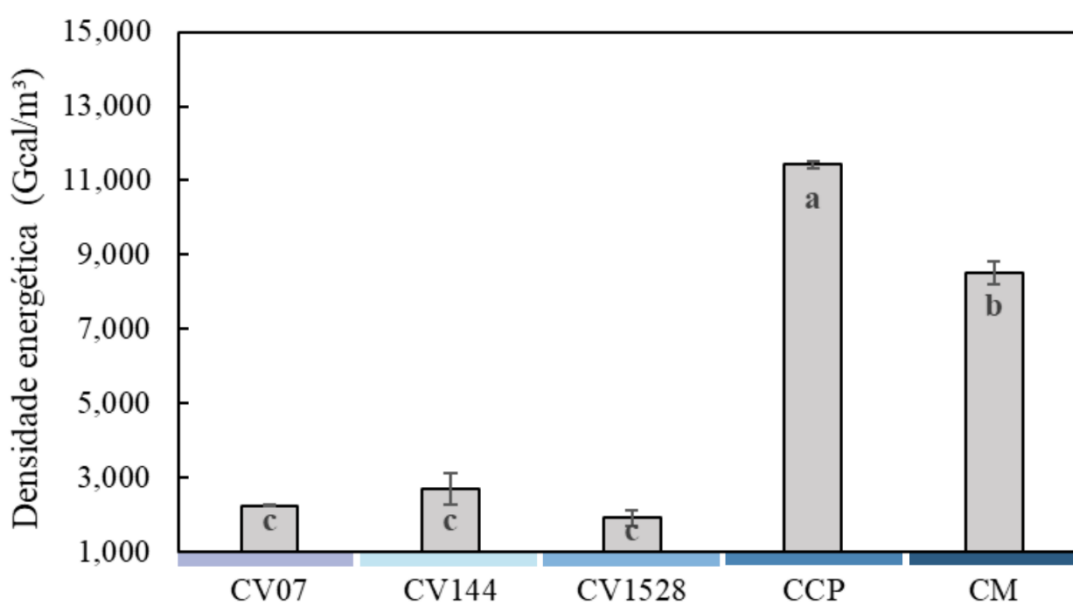
O CV1528 foi o que apresentou menor valor de poder calorífico superior quando comparado aos demais clones (Figura 9). Brand (2010) afirma que elevados teores de cinzas; o caso do clone citado, são responsáveis pela redução do poder calorífico, tendo em vista que os materiais minerais não participam de todo processo de combustão, porém são evidenciados na massa do combustível submetido ao processo de queima. Logo, o oxigênio e as cinzas quando associados contribuem negativamente para o poder calorífico. Assim, para a indústria siderúrgica, recomenda-se que a utilização de biocombustíveis com poderes caloríficos elevados contribui na eficiência da produção de energia e na utilidade enquanto redutores siderúrgicos (FROEHLICH; MOURA, 2014).

Para o poder calorífico inferior, responsável por quantificar a quantidade de energia disponível, a amostra do CCP ($7.993,336 \text{ kcal.kg}^{-1}$) apresentou melhor desempenho, seguido da amostra CV144 ($7.231,85 \text{ kcal.kg}^{-1}$), os demais apresentaram valores semelhantes entre si, com valores inferiores. Em relação ao poder calorífico útil, o CCP e o CV144, se mostraram

superiores em relação as médias, sendo estatisticamente diferentes. O CV07 ($5.611,544 \text{ kcal.kg}^{-1}$) e CV1528 ($5.699,439 \text{ kcal.kg}^{-1}$) são estatisticamente iguais segundo a Figura 9. Nota-se que o teor de carbono fixo, quando comparado com as amostras vegetais, influencia nos maiores resultados de poder calorífico, prevalecendo o CV144 como o dominante em termos de poder calorífico (Figura 9).

A densidade energética encontrada, pode ser observada na Figura 10.

Figura 10: Densidade energética dos ensaios. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.

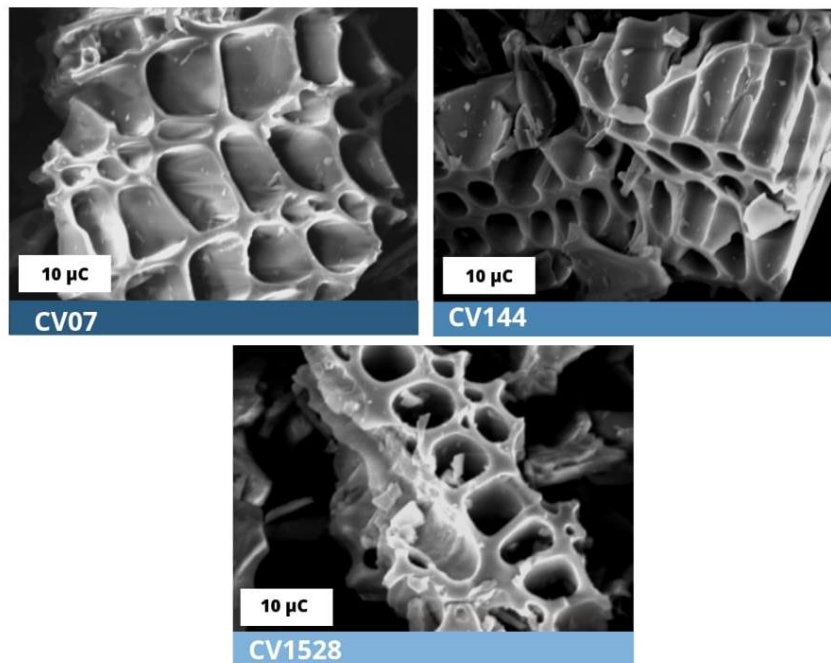


Observa-se que para a densidade energética do carvão vegetal foi verificado efeito significativo do clone, com maiores valores observados para o CV144 ($2,681 \text{ Gcal/m}^3$), seguido o CV07 ($2,251 \text{ Gcal/m}^3$) e do CV1528 ($1,917 \text{ Gcal/m}^3$). Os coques, como o esperado, foram os que mais apresentaram altos valores de densidade energética. Silva, (2016) encontrou para os clones GG100 ($2,37$ e $2,48 \text{ Gcal.m}^{-3}$, respectivamente) e para o I144 ($2,09$ e $2,27 \text{ Gcal.m}^{-3}$, 43 respectivamente). O autor ressaltou que a densidade energética é um parâmetro essencial para quantificar combustíveis sólidos, avaliando a quantidade de energia que existe estocada em um determinado volume de material. Assim, sabe-se que, o CV144 apresenta valores de energia armazenada maior que os demais, em um comparativo de biomassa.

4.4 ANÁLISE VISUAL DO CARVÃO POR MEIO DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

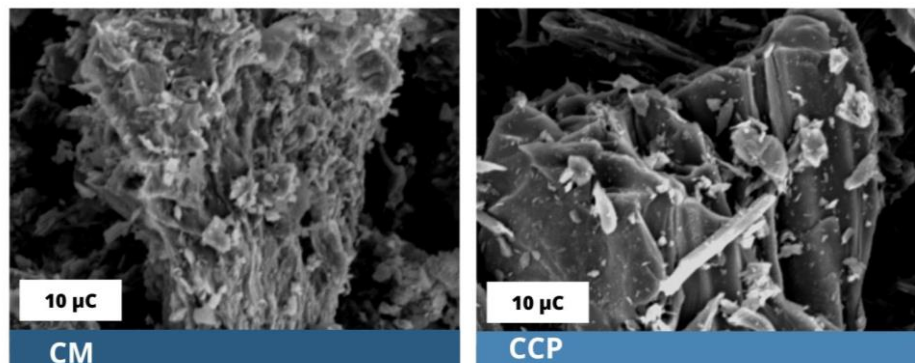
Nas Figuras 11 e 12 abaixo, é possível verificar a estrutura porosa das amostras utilizadas.

Figura 11: Análise visual dos carvões vegetais. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12: Análise visual do carvão vegetal do clone 07. Em que CM = Coque Metalúrgico; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo.



Fonte: Elaborado pela autora.

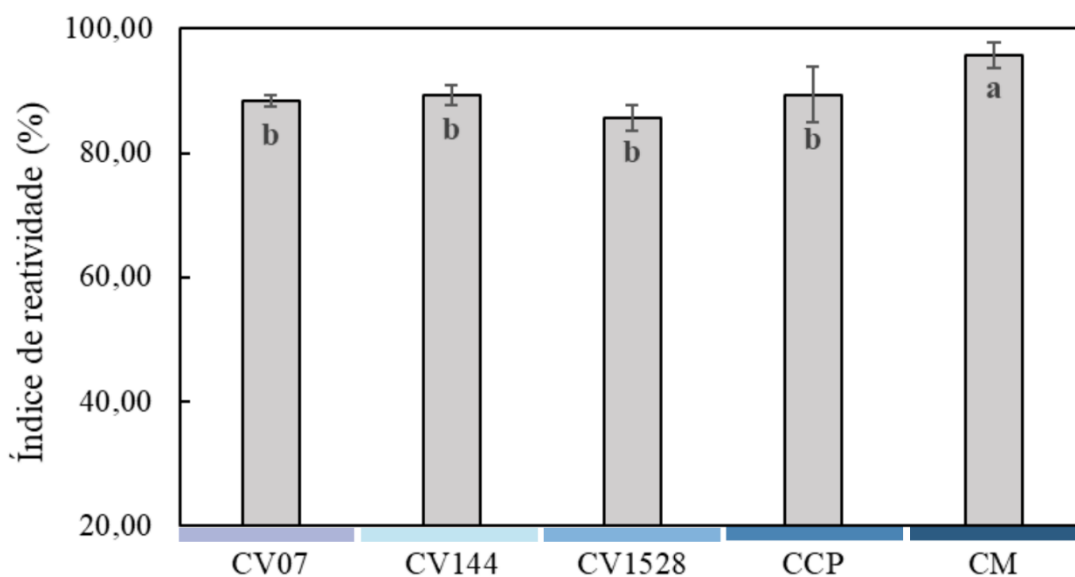
Nas imagens acima é possível visualizar a estrutura física dos materiais analisados. É possível visualizar que o CV144 apresenta uma grande quantidade de poros, mas, apesar disso, a parede celular dos mesmos é um pouco mais espessa que os demais, deduzindo que sua resistência, ainda assim seria maior. O CV07, apresenta grande quantidade de poros, que se é esperada do carvão vegetal oriundos de madeira, porém observa-se que as paredes são finas e pouco espessas, podendo ser um indicador de baixa resistência de carga. Para o CV1528 pode-se observar, apesar da menor quantidade de poros, uma parede espessa ao redor deles. Essa variável pode ser um fator interessante, atuando como indicador de maior resistência mecânica. Para as amostras CM e CCP é possível observar a baixa presença de poros em um contexto visual. É válido ressaltar que os poros dos coques – materiais oriundos da coqueificação do carvão mineral, não são naturais. Logo, por isso estes produtos tendem a ser mecanicamente mais resistentes.

Júnior et al. (2016) citou que, o carvão vegetal, naturalmente tende a apresentar um alto índice de porosidade. Fraga (2019), ainda reitera que a alta porosidade do carvão não é bem-vista no contexto siderúrgico, devido a interferência na resistência mecânica e suporte a carga.

4.4 COMPORTAMENTO DO CARVÃO VEGETAL FRENTE AOS ENSAIOS DE REATIVIDADE E ABRASÃO

Na Figura 13 é possível ver a diferenças percentuais de reatividade das amostras estudadas, onde os carvões vegetais se destacaram no alto percentual.

Figura 13: Percentual médio de reatividade. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.

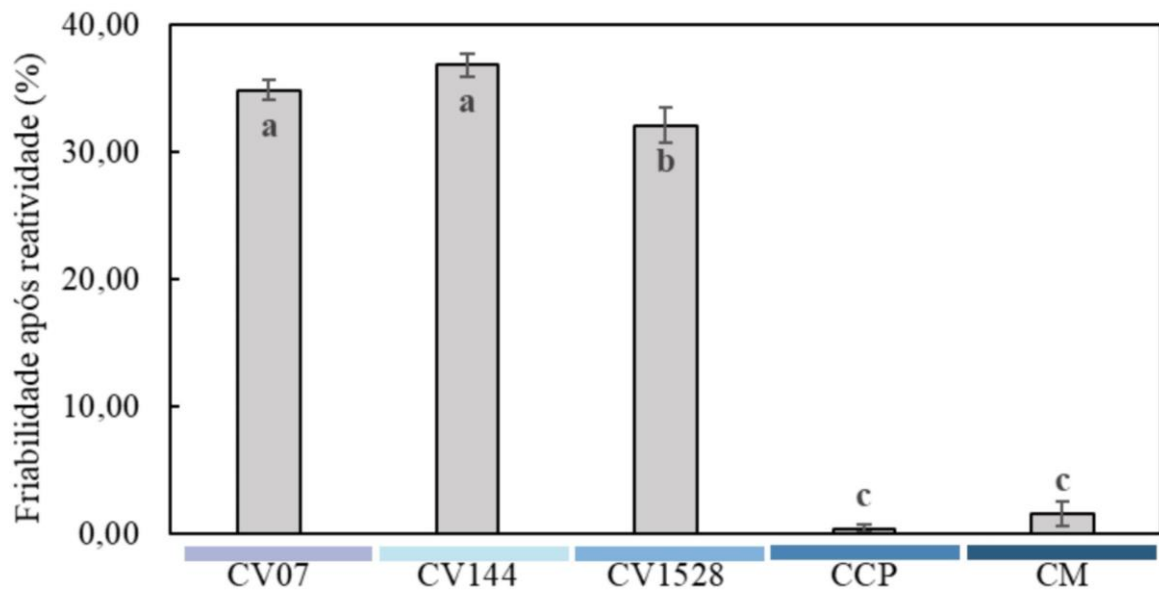


Fonte: Elaborado pela autora.

As amostras CCP (86,38%), os CV144 (89,24%), CV07 (88,35%), CV1528 (85,57%) não apresentaram diferença significativa em relação a reatividade, expressando valores inferiores ao CM que foi de 95,743% de reatividade (Figura 10). A reatividade considera a reação do coque ou carvão com o CO₂, na região superior dentro do Alto-forno. Se essa reatividade for elevada, ela produzirá carbono e oxigênio em excesso o que prejudica o rendimento gasoso e resulta na queda da temperatura da zona de reserva térmica. Na CETEC (1985), tem-se que quanto maior a temperatura de carbonização, maior será o teor em carbono fixo, desse modo, a porcentagem de CO₂ no gás de saída terá valor inferior, resultando em uma maior reatividade. Nesta análise, observou-se que a maior taxa de carbono fixo não foi o fator determinante para a obtenção de maiores valores para a reatividade para os coques minerais, mas em relação ao carvão vegetal, apresentaram proporcionalidade.

Os valores de reatividade para as amostras, apresentam relação com os valores da análise de abrasão apresentados na Figura 16.

Figura 14: Percentual médio de friabilidade das amostras. Em que CV07 = Carvão Vegetal 07; CV144 = Carvão Vegetal 144; CV1528 = Carvão Vegetal 1528; CCP = Coque de Calcinato de Petróleo; CM = Coque Metalúrgico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quando o material é submetido a abrasão, verifica-se que os carvões vegetais ficam em destaque em termos de maior friabilidade, sendo o CV144 (36,829%) estatisticamente igual ao CV07 (34,851%) e distinto estatisticamente do CV1528 (32,120%) (Figura 14). Os valores de friabilidade para as amostras de carvão vegetal não se mostraram satisfatórias segundo a Mendes e Gomes (1982), sendo classificados como muito friáveis, ou seja, apresentando porcentagem de perda na forma de finos maior que 30% em relação à massa inicial de carvão vegetal.

Dias Júnior (2018) encontrou resultados inferiores aos valores encontrados para testes de tamboramento em carvão vegetal proveniente de eucalipto. As amostras avaliadas mostraram um comportamento positivo do carvão vegetal frente aos impactos de sua utilização, mostrando-se medianamente friável (15% a 25% de finos).

Já para os coques provenientes de carvão mineral, eles apresentaram médias baixas para a reatividade, indicativo de baixo teor de friabilidade. Para Soares (2018) o material resultante dos choques mecânicos durante os processos (finos), não são aproveitados nos processos industriais, o que resulta em uma perda de material potencialmente energético, pois, mesmo abaixo da granulometria especificada para utilização na siderurgia, apresentam um alto teor de carbono. É possível observar a proporcionalidade entre a friabilidade e a reatividade na análise realizada. Amostras que obtiveram maiores valores de reatividade são as amostras mais friáveis.

Zhang et al. (2023) estudando coques explicaram que o mercado opta por coques menos reativos, em função da sua maior resistência mecânica. Quanto maior o índice de reatividade do material, maior será a quantidade de finos gerado. Neste estudo, esse parâmetro não se aplicou para o coque em estudo. Já para o carvão vegetal, nota-se a proporcionalidade entre maior índice de reatividade e consecutivamente abrasão.

5 CONCLUSÃO

O carvão vegetal mostrou boa eficiência energética na maior parte das análises realizadas neste trabalho. Apresentando boas características físicas e químicas, parâmetros tais, de grande importância para a utilização na siderurgia. É necessário ainda, aprimorar e a padronizar técnicas de carbonização e de tratamentos silviculturais, que evidenciem as propriedades dos carvões vegetais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMSTER, E.; LEVY, C. L. Impact of coal-fired power plant emissions on children's health: A systematic review of the epidemiological literature. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 11, p. 1–11, 2019
- AMSTER, E.; LEVY, C. L. Impact of coal-fired power plant emissions on children's health: A systematic review of the epidemiological literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 16, n. 11, p. 1–11, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11941 - Determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro, 2003, 6p.
- American Society for Testing and Materials. D1762 – 84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 2013.
- American Society for Testing and Materials. D5341: Standard Test Method for Measuring Coke Reactivity Index (CRI) and Coke Strength After Reaction (CSR), 2019.
- BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010.
- CAMIOTO, D. C.; FLÁVIA; DO NASCIMENTO REBELATTO, D. A. Assessment of the environmental contribution by changing the energy matrix of the brazilian pig iron and steel sector. *Gestao e Producao*, v. 21, n. 4, p. 732–744, 2014.
- CASTRO, F. S. A. **Evaluación del comportamiento carbonos coquizantes y sus mezclas térmico de carbonos del Cerrejón, en la producción de coque metalúrgico.** [s.l.] Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- CHAVES, N. O.; OLIVEIRA, R. M. P. B. As Alternativas De Aproveitamento Do Pó Do AltoForno: Uma Revisão. *Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693*, v. 12, p. 188–198, 2020.
- COSTA, L. J. **Caracterização mecânica do carvão vegetal de clones Corymbia.** [s.l.] Uniersidade Federal de Lavras, 2017.
- DELATORRE, F. M. et al. Insights acerca do uso de finos de carvão vegetal para geração de bioenergia. *Agropecuária Científica No Semiárido*, v. 16, n. 3, p. 138, 2020.
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG - DIN EN 14918: Determination of calorific value. Berlin: CEN, 2010b.63 p. EUROPEAN STANDARD NORME. EN 15103:Solid biofuels - Determination of bulk density. DIN EN 15103, Brussels 2010.
- FRAGA, M. T. **IMPREGNAÇÃO E DESMINERALIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL:**

ALTERNATIVAS PARA DIMINUIÇÃO DE REATIVIDADE VISANDO SUA UTILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE COQUE Matheus. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Escola, 2019.

FORTALEZA, A. P. et al. Forest species biomass for the production of charcoal. *Ciencia Florestal*, v. 29, n. 3, p. 1436–1451, 2019.

FROEHLICH, P. L.; MOURA, A. B. D. **CARVÃO VEGETAL : PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E PRINCIPAIS APLICAÇÕES**. v. 9, p. 1–19, 2014.

GOMES, M. T. M. **Potencialidades De Inserção Do Carvão Vegetal Em Bolsa De Mercadorias**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, 2006.

Gomes, P. A. & Oliveira, J. B. - 1980. Teoria da carbonização da madeira. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. Uso da madeira para fins energéticos. [Série de Publicações Técnicas, 1:27-41].

GORIŠEK, Ž. et al. Technological properties and usability of chinese sumac wood in comparison with ash wood. *Les/Wood*, v. 67, n. 2, p. 29–44, 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório IBÁ 2019. Brasília: IBÁ, 2019. Disponível em: < <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>> . Acesso em: 20 de novembro de 2022.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de silício metálico**. Universidade Federal de Viçosa, 2014.

ISO 18894:2006 Coke – Determination of coke reactivity index (CRI) and coke strength after reaction (CSR), International Organization for Standardization.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Dados do Setor do Aço Brasileiro**. [s.l: s.n.].

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Mercado Brasileiro do Aço. Análise setorial e regional**. [s.l: s.n.].

INSTITUTO AÇO BRASIL – IABR. **EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS – PRODUÇÃO DE METAIS**. [s.l: s.n.].

LI, K. et al. The evolution of structural order, microstructure and mineral matter of metallurgical coke in a blast furnace: A review. v. 133, p. 194–215, 2014.

LOUREIRO, B. A. et al. Carbonization gravimetric yield and qualitative characterization of charcoal from hybrid corymbia spp clones for industrial use. *Ciencia Florestal*, v. 31, n. 1, p. 214–232, 2021.

MARCOS, B. N. C. et al. Carvão mineral. *Revista Agronomia Brasileira*, v. 4, n. 1, p. 1–10, 2020.

Mendes, M. G.; Gomes, R. A.; Oliveira, J. B. - 1982. Propriedades e controle de qualidade do

carvão vegetal. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. Produção e utilização de carvão vegetal. Série de Publicações Técnicas, 6:75-89.

MOURÃO, M. B. Introdução a Siderurgia. p. 428, 2011. NEVES, T. A. et al. 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.

PROTÁSIO, T. DE P. et al. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. ***Pesquisa Florestal Brasileira***, v. 31, n. 66, p. 113–122, 2011.

PROTÁSIO, T. DE P. et al. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp aos 42 meses de idade. ***Pesquisa Florestal Brasileira***, v. 33, n. 74, p. 137–149, 2013.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018.

SILVA, M. F. DA. **Propriedades energéticas da biomassa e do carvão vegetal de espécies de bambu e clones de eucalipto**. Universidade Federal de Goiás, 2016.

SOARES, J. D. **PARÂMETROS PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA MECÂNICA DE CARVÃO VEGETAL EM PRENSA HIDRÁULICA** *Disse*. Universidade Federal de Viçosa, 2018.

VASSILEV, S. V. et al. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. ***Fuel***, v. 208, p. 377–409, 2017.

VIANA, F. L. E. et al. Indústria siderúrgica. p. 1–14, 2019.

ZHANG, X. et al. Highly reactive coke made from Low-rank Coal: Relationship between thermal properties and multilevel structure. ***Fuel***, v. 337, n. December 2022, p. 127186, 2023.