

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Clarisson Xavier de Souza

**PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO CARVÃO VEGETAL: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

São João Evangelista – MG

2026

CLARISSON XAVIER DE SOUZA

**PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO CARVÃO VEGETAL: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade

S729p Souza, Clarisson Xavier de.
Parâmetros físico-químicos do carvão vegetal: uma revisão
bibliográfica/ Clarisson Xavier de Souza – 2026.

41f.

Orientador: Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia
Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2026.

1. Carvão vegetal. 2. Propriedades físicas. 3. Propriedades
químicas. 4. Qualidade do carvão vegetal. I. Souza, Clarisson Xavier
de. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 662.74

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Clarisson Xavier de Souza

**PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO CARVÃO VEGETAL: UMA REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade

Aprovado em: 12/06/2026 pela banca examinadora:

Prof. Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade - IFMG

Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda - IFMG

Paulo Henrique Amador Miranda – IFMG

Dedica-se este trabalho à família, pelo apoio constante, incentivo e compreensão ao longo de toda a trajetória acadêmica, e a todos que acreditam na educação pública, na ciência e na pesquisa como instrumentos de transformação social e ambiental.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pela força, saúde e perseverança concedidas ao longo desta caminhada.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista, pela formação oferecida e pelas oportunidades de crescimento acadêmico e profissional.

Aos professores do curso de Engenharia Florestal, pelo conhecimento transmitido e pelo compromisso com a formação técnica e humana dos estudantes.

Ao professor orientador, pelas orientações, disponibilidade e contribuições ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas de curso e de laboratório, pela parceria e troca de experiências.

À família e aos amigos, pelo incentivo e pelo apoio incondicional.

RESUMO

O carvão vegetal apresenta ampla utilização devido às suas características energéticas e estruturais, sendo considerado um importante produto derivado da biomassa florestal. A qualidade desse material está diretamente relacionada às suas propriedades físico-químicas, que influenciam seu comportamento, desempenho e potencial de utilização. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica acerca dos principais parâmetros físico-químicos do carvão vegetal, destacando as propriedades mais empregadas na avaliação de sua qualidade. Foram abordadas as principais propriedades físicas, incluindo densidade, porosidade, área superficial, resistência mecânica e friabilidade, bem como as propriedades químicas, representadas pelos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, além do poder calorífico. A análise da literatura demonstrou que esses parâmetros constituem importantes indicadores da qualidade do carvão vegetal, uma vez que influenciam diretamente suas características estruturais e energéticas. Observou-se que maiores teores de carbono fixo e menores teores de cinzas estão associados a um melhor desempenho energético, enquanto as propriedades físicas contribuem para a estabilidade e integridade do material durante seu manuseio e utilização. Conclui-se que a caracterização físico-química é fundamental para a avaliação da qualidade do carvão vegetal, permitindo compreender os fatores que influenciam seu desempenho e suas características de utilização.

Palavras-chave: Carvão vegetal. Propriedades físicas. Propriedades químicas. Qualidade do carvão vegetal.

ABSTRACT

Charcoal is widely used due to its energetic and structural characteristics, being considered an important product derived from forest biomass. The quality of this material is directly related to its physicochemical properties, which influence its behavior, performance, and potential applications. In this context, the present study aimed to carry out a bibliographic review of the main physicochemical parameters of charcoal, highlighting the properties most commonly used in quality assessment. The main physical properties addressed included density, porosity, surface area, mechanical strength, and friability, while the chemical properties comprised fixed carbon content, volatile matter content, ash content, and calorific value. The literature analysis showed that these parameters are important indicators of charcoal quality, as they directly influence its structural and energetic characteristics. Higher fixed carbon contents and lower ash contents are generally associated with better energetic performance, whereas physical properties contribute to the stability and integrity of the material during handling and use. It is concluded that physicochemical characterization is essential for evaluating the quality of charcoal, allowing a better understanding of the factors that influence its performance and utilization characteristics.

Keywords: Charcoal. Physical Properties. Chemical Properties. Charcoal quality.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

PCS – Poder Calorífico Superior

TCF – Teor de Carbono Fixo

TCz – Teor de Cinzas

TMV – Teor de Materiais Voláteis

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo geral	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	METODOLOGIA	12
3.1	Coleta de dados	12
3.2	Seleção dos estudos	12
3.3	Análise das informações	12
4	REVISÃO DE LITERATURA	13
4.1	Propriedades do carvão vegetal	13
4.2	Propriedades físicas do carvão vegetal	13
4.2.1	<i>Densidade aparente e densidade a granel</i>	16
4.2.2	<i>Porosidade e área superficial</i>	19
4.2.3	<i>Resistência mecânica e friabilidade</i>	21
4.3	Propriedades químicas do carvão vegetal	24
4.3.1	<i>Teor de carbono fixo</i>	28
4.3.2	<i>Teor de materiais voláteis</i>	30
4.3.3	<i>Teor de cinzas</i>	33
4.3.4	<i>Poder calorífico</i>	36
5	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

O carvão vegetal constitui um dos principais produtos obtidos a partir da biomassa florestal e apresenta ampla utilização em diferentes segmentos industriais devido às suas características energéticas e estruturais. Entre as matérias-primas empregadas para sua produção, destacam-se as espécies do gênero *Eucalyptus*, amplamente cultivadas no Brasil em função de sua elevada produtividade, rápido crescimento e adaptação às diversas condições edafoclimáticas do país (PROTÁSIO, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2010).

A qualidade do carvão vegetal está diretamente relacionada às suas propriedades físico-químicas, as quais refletem as características da matéria-prima utilizada e as transformações ocorridas durante o processo de carbonização. Esses parâmetros constituem importantes indicadores do comportamento do material e permitem avaliar sua adequação às diferentes aplicações energéticas e industriais (MENDES *et al.*, 1982; PROTÁSIO *et al.*, 2013).

Dentre as propriedades físicas mais relevantes para a caracterização do carvão vegetal destacam-se a densidade, a porosidade, a área superficial, a resistência mecânica e a friabilidade, características que influenciam diretamente sua estabilidade estrutural, armazenamento, transporte e desempenho operacional. De forma complementar, as propriedades químicas, representadas principalmente pelo teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e poder calorífico, são amplamente utilizadas na avaliação da qualidade energética do material, uma vez que estão associadas à capacidade de geração de energia e ao comportamento térmico do carvão vegetal (NEVES *et al.*, 2011; ASSIS *et al.*, 2012; PROTÁSIO *et al.*, 2013).

A compreensão dessas propriedades é fundamental para a caracterização da qualidade do carvão vegetal, uma vez que os parâmetros físicos e químicos apresentam forte interdependência e exercem influência direta sobre o desempenho do material. Dessa forma, o conhecimento científico acerca dessas características contribui para a avaliação da qualidade do carvão vegetal e para a compreensão dos fatores que condicionam seu comportamento em diferentes aplicações (PROTÁSIO *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais parâmetros físico-químicos do carvão vegetal, abordando as características físicas e químicas mais utilizadas na avaliação de sua qualidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais parâmetros físico-químicos do carvão vegetal, destacando sua importância na avaliação da qualidade do material.

2.2 Objetivos específicos

- a) Descrever as principais propriedades físicas utilizadas na caracterização do carvão vegetal;
- b) Apresentar as principais propriedades químicas empregadas na avaliação da qualidade do carvão vegetal;
- c) Analisar a influência dos parâmetros físico-químicos sobre as características e a qualidade do carvão vegetal;
- d) Reunir e discutir informações da literatura científica relacionadas à caracterização físico-química do carvão vegetal.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza qualitativa, desenvolvida com o objetivo de reunir, analisar e integrar informações científicas relacionadas aos parâmetros físico-químicos do carvão vegetal, com foco nas principais propriedades utilizadas para avaliação de sua qualidade.

3.1 Coleta de dados

A coleta de dados foi realizada por meio de levantamento bibliográfico em fontes secundárias, incluindo artigos científicos, livros, dissertações, teses e documentos técnicos relacionados ao tema. As buscas foram conduzidas em bases de dados científicas consolidadas, como Google Acadêmico (Google Scholar) e SciELO. Foram utilizados descritores previamente definidos, tais como: “carvão vegetal”, “Eucalyptus”, “propriedades físicas”, “propriedades químicas”, “qualidade do carvão vegetal” e “parâmetros físico-químicos”.

3.2 Seleção dos estudos

A seleção dos materiais foi realizada de forma sistematizada, com base em critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Foram incluídos estudos que abordassem diretamente as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal, priorizando trabalhos recentes sem prejuízo da inclusão de estudos clássicos amplamente reconhecidos na literatura científica. Foram excluídos trabalhos sem relação direta com a temática proposta ou que não apresentassem rigor técnico-científico adequado.

3.3 Análise das informações

As informações coletadas foram analisadas de forma descritiva e interpretativa, a partir da organização e sistematização dos dados obtidos na literatura selecionada. A análise concentrou-se nas principais propriedades físicas e químicas empregadas na caracterização do carvão vegetal, incluindo densidade, porosidade, resistência mecânica, friabilidade, teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e poder calorífico. A abordagem adotada buscou reunir e discutir informações relevantes sobre esses parâmetros, evidenciando sua importância na avaliação da qualidade do carvão vegetal.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Propriedades do carvão vegetal

As propriedades do carvão vegetal são influenciadas pelas características da matéria-prima e pelas condições da carbonização, refletindo o comportamento do material em diferentes aplicações. A interpretação integrada desses parâmetros é fundamental, pois estão inter-relacionados: o aumento do teor de carbono fixo, por exemplo, está geralmente associado à redução de materiais voláteis e ao aumento do poder calorífico, enquanto alterações na porosidade afetam simultaneamente a reatividade e a resistência mecânica do material (NEVES *et al.*, 2011; ASSIS *et al.*, 2012).

4.2 Propriedades físicas do carvão vegetal

As propriedades físicas do carvão vegetal representam um conjunto de características estruturais diretamente relacionadas ao comportamento do material durante o transporte, armazenamento e utilização industrial. Essas propriedades são determinadas pela interação entre as características da matéria-prima e as condições operacionais da carbonização, refletindo as transformações térmicas ocorridas ao longo da pirólise da madeira. Oliveira *et al.* (2010) destacam que a estrutura física do carvão vegetal exerce influência significativa sobre sua qualidade energética e sobre seu desempenho em aplicações industriais, especialmente nos setores siderúrgico e metalúrgico.

No contexto da produção de carvão vegetal, as propriedades físicas estão diretamente associadas à formação da matriz carbonosa e ao desenvolvimento da estrutura porosa do material durante a degradação térmica da biomassa. Mohan *et al.* (2006) observam que a remoção progressiva dos compostos voláteis ao longo da pirólise provoca profundas alterações estruturais na madeira original, resultando na formação de uma rede de poros e cavidades responsável por grande parte das características físicas do carvão vegetal.

A estrutura física do carvão vegetal depende simultaneamente das propriedades anatômicas da madeira e das condições térmicas aplicadas durante a carbonização. Protásio *et al.* (2013) ressaltam que variáveis operacionais como temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de residência influenciam diretamente a organização estrutural da matriz carbonosa, afetando parâmetros como densidade, porosidade e resistência mecânica do material produzido.

Entre as principais propriedades físicas do carvão vegetal destacam-se densidade aparente, densidade a granel, porosidade, área superficial e resistência mecânica. Oliveira *et al.* (2010) argumentam que esses parâmetros apresentam forte relação entre si, uma vez que alterações na estrutura interna do carvão podem modificar simultaneamente diferentes características físicas do material.

A formação da porosidade constitui um dos principais fenômenos estruturais observados durante a carbonização da madeira. Mohan *et al.* (2006) descrevem que a degradação térmica dos constituintes lignocelulósicos promove intensa liberação de gases e vapores, deixando espaços vazios na estrutura residual da biomassa e originando a rede porosa característica do carvão vegetal.

A porosidade influencia diretamente propriedades como área superficial específica, reatividade térmica e capacidade de transferência de massa do carvão vegetal. Bridgwater (2012) destaca que carvões mais porosos tendem a apresentar maior área de contato com gases e reagentes, característica importante em processos de combustão e redução metalúrgica.

Entretanto, a elevada porosidade também pode comprometer determinadas propriedades físicas do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2013) observam que estruturas excessivamente porosas frequentemente apresentam menor resistência mecânica e maior suscetibilidade à fragmentação durante o manuseio e transporte.

A densidade do carvão vegetal está diretamente relacionada ao grau de preservação estrutural da biomassa durante a carbonização. Oliveira *et al.* (2010) relatam que madeiras com maior densidade básica geralmente originam carvão com maior densidade aparente, característica associada à maior concentração de material carbonoso por unidade de volume.

As condições operacionais da carbonização também exercem forte influência sobre a densidade do carvão vegetal. Mohan *et al.* (2006) argumentam que temperaturas mais elevadas tendem a aumentar a degradação estrutural da biomassa e ampliar a formação de poros, podendo reduzir a densidade aparente do carvão produzido.

A relação entre densidade e qualidade do carvão vegetal é frequentemente discutida na literatura devido à influência desse parâmetro sobre o desempenho industrial do material. Protásio *et al.* (2013) destacam que carvões mais densos normalmente apresentam maior resistência mecânica e menor geração de finos durante operações de transporte e utilização industrial.

Outro aspecto relevante associado às propriedades físicas corresponde à resistência mecânica do carvão vegetal. Bridgwater (2012) observa que a capacidade do carvão em suportar

esforços físicos sem sofrer fragmentação excessiva está diretamente relacionada à organização estrutural da matriz carbonosa formada durante a pirólise.

A resistência mecânica sofre influência tanto da matéria-prima quanto das condições de carbonização. Oliveira *et al.* (2010) argumentam que carbonizações conduzidas sob condições térmicas mais estáveis tendem a produzir estruturas carbonosas mais homogêneas, favorecendo maior integridade física do carvão vegetal.

A fragmentação do carvão vegetal durante o manuseio representa fator importante devido à formação de partículas finas e perda de material útil. Protásio *et al.* (2013) ressaltam que carvões com baixa resistência mecânica podem apresentar maiores índices de friabilidade, comprometendo a eficiência operacional em processos industriais que demandam granulometria mais uniforme.

A área superficial específica do carvão vegetal também constitui importante propriedade física associada à estrutura porosa do material. Mohan *et al.* (2006) destacam que o desenvolvimento da rede de poros durante a pirólise amplia significativamente a superfície interna do carvão, influenciando sua reatividade química e térmica.

A reatividade do carvão vegetal apresenta forte relação com sua estrutura física interna. Bridgwater (2012) argumenta que materiais com maior área superficial e elevada porosidade tendem a apresentar maior velocidade de reação durante processos de combustão e gaseificação.

Entretanto, parte da literatura ressalta que o aumento da reatividade nem sempre está associado à melhoria global da qualidade física do carvão vegetal. Oliveira *et al.* (2010) observam que estruturas extremamente porosas podem comprometer simultaneamente a resistência mecânica e a estabilidade estrutural do material.

As divergências observadas entre diferentes estudos frequentemente estão relacionadas às diferenças nas condições de carbonização e nas características da biomassa utilizada. Protásio *et al.* (2013) destacam que propriedades físicas do carvão vegetal podem variar significativamente conforme espécie florestal, temperatura final da carbonização e nível de controle operacional do processo.

Além disso, alguns autores apontam dificuldades na comparação direta de resultados devido à ausência de completa padronização metodológica em determinadas análises físicas do carvão vegetal. Mohan *et al.* (2006) argumentam que diferenças nos procedimentos de determinação da porosidade, densidade e resistência mecânica podem influenciar significativamente os resultados obtidos em diferentes pesquisas.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se à forte interdependência entre as propriedades físicas do carvão vegetal. Bridgwater (2012) ressalta que alterações estruturais

provocadas pela carbonização geralmente afetam simultaneamente parâmetros como densidade, porosidade, resistência mecânica e área superficial, dificultando a análise isolada de cada propriedade.

Nesse contexto, as propriedades físicas do carvão vegetal refletem diretamente as transformações estruturais ocorridas durante a carbonização da biomassa florestal. Características como densidade, porosidade, área superficial e resistência mecânica estão intimamente relacionadas às condições operacionais da pirólise e à estrutura da matéria-prima utilizada, influenciando simultaneamente o comportamento térmico, a estabilidade física e o desempenho industrial do carvão vegetal produzido.

4.2.1 Densidade aparente e densidade a granel

A densidade aparente e a densidade a granel constituem importantes propriedades físicas do carvão vegetal, estando diretamente relacionadas ao desempenho do material durante o transporte, armazenamento e utilização industrial. Esses parâmetros refletem a organização estrutural da matriz carbonosa formada durante a carbonização e influenciam simultaneamente aspectos energéticos, mecânicos e logísticos do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2016) destaca que a densidade representa um dos principais indicadores da qualidade física do carvão, devido à sua relação direta com resistência mecânica, concentração energética e estabilidade estrutural do material.

No contexto da produção de carvão vegetal para fins energéticos e siderúrgicos, a avaliação da densidade assume elevada relevância devido à necessidade de obtenção de um produto fisicamente homogêneo e operacionalmente estável. Mendes *et al.* (1982) observam que carvões com maior densidade tendem a apresentar melhor desempenho em aplicações industriais que exigem maior resistência à fragmentação e maior concentração de massa carbonosa por unidade de volume.

A densidade aparente corresponde à relação entre a massa do carvão vegetal e o volume efetivamente ocupado pelo material sólido, considerando os poros internos presentes na estrutura carbonosa. Protásio *et al.* (2016) descreve esse parâmetro como indicador diretamente associado ao grau de preservação estrutural da madeira após a carbonização e à intensidade das transformações térmicas ocorridas durante a pirólise.

A formação da densidade aparente do carvão vegetal depende simultaneamente das propriedades da matéria-prima e das condições operacionais da carbonização. Oliveira *et al.* (2010) destacam que madeiras com maior densidade básica geralmente originam carvão vegetal

mais denso, devido à maior quantidade de material lignocelulósico disponível para formação da matriz carbonosa residual.

As condições térmicas da carbonização também influenciam diretamente a densidade aparente do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) argumentam que temperaturas mais elevadas favorecem maior degradação estrutural da biomassa e intensificam a formação de poros internos, podendo provocar redução da densidade aparente do material carbonizado.

A relação entre densidade aparente e porosidade está diretamente associada à liberação de compostos voláteis durante a pirólise. Protásio *et al.* (2016) ressalta que a eliminação progressiva de gases e vapores orgânicos provoca alterações estruturais na matriz carbonosa, ampliando a formação de cavidades internas e modificando a compactação do carvão vegetal.

A densidade aparente também apresenta forte relação com a resistência mecânica do carvão vegetal. Oliveira *et al.* (2010) observam que carvões mais densos geralmente possuem estrutura mais compacta e maior integridade física, condição que reduz a formação de finos durante operações de manuseio, transporte e armazenamento.

A resistência à fragmentação constitui fator particularmente importante em aplicações siderúrgicas, nas quais o carvão vegetal é submetido a diferentes esforços mecânicos ao longo do processo industrial. Mendes *et al.* (1982) destacam que materiais com baixa densidade aparente tendem a apresentar maior friabilidade e menor estabilidade estrutural, comprometendo o desempenho operacional do carvão vegetal.

Além da densidade aparente, a densidade a granel representa importante parâmetro físico relacionado às características logísticas e operacionais do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2016) descreve a densidade a granel como a relação entre a massa total do carvão e o volume ocupado pelo conjunto de partículas, incluindo os espaços vazios existentes entre elas.

A densidade a granel sofre influência direta da granulometria, da forma das partículas e do grau de fragmentação do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) observam que carvões mais friáveis tendem a gerar maior quantidade de partículas finas, alterando a acomodação do material e modificando o volume ocupado durante armazenamento e transporte.

A organização das partículas dentro do volume analisado interfere significativamente nos valores de densidade a granel obtidos experimentalmente. Oliveira *et al.* (2010) destacam que diferenças na granulometria e na distribuição das partículas podem provocar variações importantes na compactação do carvão vegetal e, conseqüentemente, na densidade a granel do material.

A densidade a granel também apresenta relação direta com a eficiência logística do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) argumentam que materiais com maior densidade

volumétrica permitem melhor aproveitamento do espaço disponível durante transporte e armazenamento, reduzindo custos operacionais associados à movimentação do produto.

As propriedades estruturais do carvão vegetal influenciam simultaneamente densidade aparente e densidade a granel, embora esses parâmetros representem aspectos distintos da organização física do material. Protásio *et al.* (2016) ressalta que alterações na estrutura porosa interna do carvão podem modificar a densidade aparente, enquanto mudanças na granulometria e acomodação das partículas afetam principalmente a densidade a granel.

Parte da literatura aponta que o controle das condições de carbonização exerce influência decisiva sobre esses parâmetros físicos. Oliveira *et al.* (2010) observam que sistemas de carbonização com maior estabilidade térmica tendem a produzir carvão mais homogêneo, reduzindo variações estruturais que afetam simultaneamente densidade aparente e densidade a granel.

As divergências encontradas entre diferentes estudos frequentemente estão relacionadas às características específicas da biomassa utilizada e às condições operacionais da carbonização. Mendes *et al.* (1982) destacam que diferenças na espécie florestal, na temperatura final da pirólise e na metodologia de determinação dos parâmetros podem influenciar significativamente os resultados de densidade do carvão vegetal.

Além disso, alguns autores ressaltam que a interpretação isolada desses parâmetros pode não representar adequadamente a qualidade física global do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2016) argumenta que a densidade deve ser analisada conjuntamente com outras propriedades físicas, como porosidade, resistência mecânica e friabilidade, devido à forte interação existente entre esses fatores estruturais.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se ao equilíbrio entre densidade e reatividade térmica do carvão vegetal. Oliveira *et al.* (2010) observam que carvões excessivamente densos podem apresentar menor área superficial e menor reatividade, enquanto materiais muito porosos frequentemente apresentam baixa resistência mecânica e elevada fragmentação.

Nesse contexto, a densidade aparente e a densidade a granel representam importantes indicadores das propriedades físicas do carvão vegetal, refletindo simultaneamente a estrutura interna da matriz carbonosa e o comportamento do material em operações industriais e logísticas. Esses parâmetros apresentam forte relação com as características da matéria-prima e com as condições operacionais da carbonização, influenciando diretamente resistência mecânica, compactação, estabilidade estrutural e desempenho físico do carvão vegetal produzido.

4.2.2 Porosidade e área superficial

A porosidade e a área superficial constituem propriedades físicas fundamentais do carvão vegetal, estando diretamente relacionadas à estrutura interna formada durante o processo de carbonização da madeira. Essas características influenciam o comportamento térmico, a reatividade química e a estabilidade estrutural do material, afetando simultaneamente seu desempenho energético e industrial. Brito *et al.* (1984) destacam que a formação da estrutura porosa do carvão vegetal resulta das transformações térmicas ocorridas durante a degradação dos constituintes lignocelulósicos da biomassa.

No contexto da produção de carvão vegetal, a porosidade apresenta elevada importância devido à sua influência sobre a circulação de gases, transferência de calor e velocidade das reações químicas envolvendo o material carbonizado. Oliveira *et al.* (2010) observam que alterações na estrutura porosa do carvão podem modificar significativamente propriedades relacionadas à combustão, gaseificação e redução metalúrgica.

A porosidade do carvão vegetal é formada principalmente pela liberação de compostos voláteis durante a pirólise da madeira. Mohan *et al.* (2006) descrevem que a decomposição térmica da hemicelulose, da celulose e da lignina promove a saída progressiva de gases e vapores orgânicos da estrutura lignocelulósica, originando uma rede complexa de cavidades e canais internos no material residual.

A formação dos poros está diretamente relacionada à intensidade das transformações térmicas ocorridas durante a carbonização. Brito *et al.* (1984) argumentam que temperaturas mais elevadas favorecem maior degradação estrutural da biomassa e ampliam a remoção de compostos voláteis, contribuindo para aumento da porosidade do carvão vegetal.

A distribuição e o tamanho dos poros também sofrem influência das condições operacionais da carbonização. Oliveira *et al.* (2010) destacam que variáveis como temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de residência afetam diretamente a organização estrutural da matriz carbonosa e o desenvolvimento da rede porosa do material.

A estrutura porosa do carvão vegetal apresenta relação direta com a área superficial específica do material. Mohan *et al.* (2006) observam que a presença de grande quantidade de cavidades internas amplia significativamente a superfície disponível para contato com gases e reagentes, aumentando a área superficial do carvão vegetal.

A área superficial constitui importante parâmetro associado à reatividade térmica e química do carvão vegetal. Brito *et al.* (1984) relatam que materiais com maior área superficial

tendem a apresentar maior interação com oxigênio e outros agentes reacionais, favorecendo processos de combustão e redução metalúrgica.

A elevada área superficial também influencia a velocidade das reações térmicas envolvendo o carvão vegetal. Oliveira *et al.* (2010) argumentam que carvões mais porosos geralmente apresentam maior facilidade de ignição e maior velocidade de reação durante a combustão, devido à maior disponibilidade de superfície para contato com os gases reacionais.

Entretanto, parte da literatura aponta que o aumento excessivo da porosidade pode comprometer determinadas propriedades físicas do carvão vegetal. Mohan *et al.* (2006) destacam que estruturas altamente porosas frequentemente apresentam menor resistência mecânica e maior susceptibilidade à fragmentação durante operações de transporte e manuseio.

A relação entre porosidade e resistência mecânica está associada à redução da integridade estrutural da matriz carbonosa. Brito *et al.* (1984) observam que o aumento excessivo do volume de vazios internos reduz a compactação do material sólido remanescente, favorecendo a formação de carvão mais friável e estruturalmente menos resistente.

Além da influência das condições operacionais, a porosidade do carvão vegetal também depende das características anatômicas e químicas da madeira utilizada na carbonização. Oliveira *et al.* (2010) ressaltam que diferenças na estrutura celular da biomassa e na composição lignocelulósica da madeira influenciam diretamente a formação dos poros durante a pirólise.

A estrutura anatômica original da madeira exerce papel importante na organização da rede porosa do carvão vegetal. Mohan *et al.* (2006) argumentam que parte da estrutura celular da biomassa é parcialmente preservada após a carbonização, influenciando o tamanho, a forma e a distribuição dos poros presentes na matriz carbonosa residual.

As condições de aquecimento também interferem significativamente na formação da área superficial do carvão vegetal. Brito *et al.* (1984) destacam que carbonizações conduzidas em temperaturas mais elevadas tendem a favorecer maior desenvolvimento da microporosidade, ampliando a superfície interna do material carbonizado.

Entretanto, alguns autores apontam que temperaturas excessivamente elevadas podem provocar colapso parcial da estrutura carbonosa e redução da estabilidade física do carvão vegetal. Oliveira *et al.* (2010) observam que alterações estruturais intensas durante a carbonização podem comprometer simultaneamente a resistência mecânica e a integridade dos poros formados na matriz carbonosa.

As divergências observadas entre diferentes estudos frequentemente estão relacionadas às metodologias utilizadas na determinação da porosidade e da área superficial do carvão vegetal. Mohan *et al.* (2006) relatam que diferentes técnicas analíticas podem gerar variações

significativas nos resultados obtidos, especialmente em materiais com elevada heterogeneidade estrutural.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se à forte interação entre porosidade, densidade e reatividade do carvão vegetal. Brito *et al.* (1984) argumentam que alterações na estrutura porosa modificam simultaneamente diferentes propriedades físicas do material, dificultando a análise isolada dos efeitos da porosidade sobre o desempenho do carvão vegetal.

A relação entre área superficial e qualidade do carvão vegetal também depende das exigências específicas de cada aplicação industrial. Oliveira *et al.* (2010) destacam que processos siderúrgicos frequentemente demandam equilíbrio entre elevada reatividade térmica e adequada resistência mecânica, condição diretamente associada ao controle da estrutura porosa do carvão vegetal.

Além disso, parte da literatura ressalta que a porosidade pode influenciar o comportamento térmico do carvão vegetal durante o armazenamento e utilização industrial. Mohan *et al.* (2006) observam que materiais altamente porosos apresentam maior capacidade de adsorção de gases e umidade, característica que pode alterar determinadas propriedades energéticas e estruturais do carvão.

Nesse contexto, a porosidade e a área superficial representam propriedades físicas diretamente relacionadas às transformações estruturais ocorridas durante a carbonização da biomassa florestal. A formação da rede porosa do carvão vegetal influencia simultaneamente reatividade térmica, resistência mecânica, densidade e comportamento energético do material, evidenciando a forte relação entre estrutura carbonosa, condições operacionais da pirólise e qualidade física do carvão vegetal produzido.

4.2.3 Resistência mecânica e friabilidade

A resistência mecânica e a friabilidade constituem propriedades físicas fundamentais para avaliação da integridade estrutural do carvão vegetal durante o armazenamento, transporte e utilização industrial. Essas características estão diretamente relacionadas à capacidade do material em suportar esforços físicos sem sofrer fragmentação excessiva, influenciando simultaneamente o desempenho operacional e a eficiência energética do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2016) destaca que a resistência mecânica representa um importante indicador da qualidade física do carvão, especialmente em aplicações industriais que demandam estabilidade estrutural e baixa geração de finos.

No contexto da utilização industrial do carvão vegetal, a resistência mecânica assume elevada relevância devido às diversas etapas de movimentação e manuseio às quais o material é submetido. Assis *et al.* (2012) observam que o carvão vegetal utilizado em processos siderúrgicos frequentemente sofre impactos, compressões e atritos mecânicos ao longo das etapas de transporte, carregamento e utilização em altos-fornos, tornando necessária a manutenção de adequada integridade física do material.

A resistência mecânica pode ser compreendida como a capacidade do carvão vegetal em resistir à ação de forças externas sem ocorrer ruptura significativa da estrutura carbonosa. Protásio *et al.* (2016) descreve essa propriedade como resultado da interação entre densidade, porosidade, organização estrutural da matriz carbonosa e condições operacionais da carbonização.

A formação da resistência mecânica do carvão vegetal está diretamente associada às transformações estruturais ocorridas durante a pirólise da madeira. Assis *et al.* (2012) destacam que a degradação térmica dos constituintes lignocelulósicos altera significativamente a organização da biomassa original, influenciando a compactação e a estabilidade da matriz carbonosa formada ao final da carbonização.

A densidade aparente do carvão vegetal apresenta forte relação com sua resistência mecânica. Protásio *et al.* (2016) argumenta que carvões mais densos geralmente apresentam maior compactação estrutural e maior capacidade de suportar esforços mecânicos sem sofrer fragmentação excessiva.

A porosidade da matriz carbonosa também interfere diretamente na resistência física do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) observam que estruturas excessivamente porosas tendem a apresentar menor integridade mecânica devido à redução da quantidade de material sólido disponível para sustentação estrutural da matriz carbonosa.

A influência das condições operacionais da carbonização sobre a resistência mecânica do carvão vegetal é amplamente discutida na literatura. Protásio *et al.* (2016) destaca que temperatura final, taxa de aquecimento e estabilidade térmica do processo afetam diretamente a organização estrutural do carvão e sua capacidade de resistir à fragmentação.

Carbonizações conduzidas sob condições térmicas instáveis frequentemente resultam em carvão vegetal com estrutura heterogênea e menor resistência física. Assis *et al.* (2012) relatam que oscilações excessivas de temperatura e entrada descontrolada de oxigênio podem provocar degradação irregular da biomassa, favorecendo formação de regiões estruturalmente frágeis na matriz carbonosa.

A friabilidade corresponde à tendência do carvão vegetal em sofrer fragmentação e geração de partículas finas quando submetido a esforços mecânicos. Protásio *et al.* (2016) descreve a friabilidade como propriedade inversamente relacionada à resistência mecânica, sendo frequentemente utilizada como indicador da estabilidade física do carvão vegetal durante operações industriais.

A geração de finos decorrente da elevada friabilidade representa importante problema operacional em diferentes aplicações industriais do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) observam que partículas muito pequenas podem comprometer a circulação de gases em altos-fornos e reduzir a eficiência térmica de processos siderúrgicos e energéticos.

A friabilidade está diretamente relacionada à organização estrutural da matriz carbonosa e à presença de microfissuras no material. Protásio *et al.* (2016) argumenta que alterações intensas na estrutura da biomassa durante a carbonização podem favorecer a formação de carvão mais quebradiço e suscetível à fragmentação mecânica.

A intensidade das transformações térmicas ocorridas durante a pirólise influencia significativamente a friabilidade do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) destacam que temperaturas excessivamente elevadas podem provocar aumento da fragilidade estrutural devido à intensificação da degradação da matriz carbonosa e ampliação da porosidade interna do material.

Além das condições operacionais, as características da matéria-prima também exercem influência importante sobre a resistência mecânica e a friabilidade do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2016) observa que madeiras com maior densidade básica tendem a produzir carvão mais resistente mecanicamente, devido à formação de estrutura carbonosa mais compacta e estável.

As propriedades anatômicas da madeira original também influenciam a integridade estrutural do carvão vegetal após a carbonização. Assis *et al.* (2012) relatam que diferenças na organização celular da biomassa podem modificar a distribuição de tensões internas na matriz carbonosa, afetando sua resistência à fragmentação.

Parte da literatura aponta que a relação entre resistência mecânica e qualidade do carvão vegetal depende diretamente da finalidade de utilização do material. Couto *et al.* (2015) destaca que aplicações siderúrgicas geralmente demandam carvão com elevada resistência física para suportar cargas mecânicas e manter estabilidade estrutural durante os processos de redução metalúrgica.

Entretanto, alguns autores ressaltam que elevada resistência mecânica nem sempre está associada às melhores propriedades energéticas do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) observam

que carvões excessivamente densos e compactos podem apresentar menor reatividade térmica, devido à redução da área superficial e da porosidade da matriz carbonosa.

As divergências observadas entre diferentes estudos frequentemente estão relacionadas às metodologias empregadas na avaliação da resistência mecânica e da friabilidade do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2016) argumenta que a ausência de completa padronização dos ensaios físicos pode dificultar comparações diretas entre resultados obtidos em diferentes pesquisas.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se à forte interação entre resistência mecânica, densidade e porosidade do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) destacam que alterações estruturais provocadas pela carbonização afetam simultaneamente diferentes propriedades físicas do material, tornando complexa a análise isolada da resistência mecânica.

Além disso, parte da literatura ressalta que a friabilidade do carvão vegetal pode aumentar progressivamente durante o armazenamento e transporte do material. Protásio *et al.* (2016) observa que impactos sucessivos e variações de umidade podem provocar deterioração gradual da estrutura carbonosa, intensificando a geração de finos ao longo da cadeia produtiva.

Nesse contexto, a resistência mecânica e a friabilidade representam propriedades físicas diretamente relacionadas à estabilidade estrutural do carvão vegetal e ao seu comportamento operacional em aplicações industriais. A integridade física da matriz carbonosa depende da interação entre características da matéria-prima, condições térmicas da carbonização e organização estrutural do material, influenciando simultaneamente a geração de finos, a resistência à fragmentação e o desempenho físico do carvão vegetal produzido.

4.3 Propriedades químicas do carvão vegetal

As propriedades químicas do carvão vegetal constituem um dos principais conjuntos de parâmetros utilizados para avaliação de sua qualidade energética e industrial. Essas propriedades refletem diretamente as transformações químicas ocorridas durante a carbonização da biomassa lignocelulósica e condicionam o comportamento do material em processos de combustão, redução metalúrgica e aproveitamento energético. Mendes *et al.* (1982) destacam que a composição química do carvão vegetal representa importante indicador da eficiência da carbonização e do grau de conversão térmica da madeira durante a pirólise.

No contexto da produção de carvão vegetal para fins siderúrgicos e energéticos, as propriedades químicas assumem elevada relevância devido à sua influência sobre o poder calorífico, a estabilidade térmica e a eficiência de utilização do material carbonizado. Protásio *et al.* (2013) observam que parâmetros químicos como teor de carbono fixo, materiais voláteis

e teor de cinzas apresentam relação direta com o desempenho energético do carvão vegetal e com sua adequação às exigências industriais.

As propriedades químicas do carvão vegetal são fortemente influenciadas pelas características da matéria-prima e pelas condições operacionais da carbonização. Neves *et al.* (2011) ressaltam que temperatura final, taxa de aquecimento, tempo de residência e disponibilidade de oxigênio interferem diretamente na composição química do material produzido, modificando a intensidade das reações térmicas da biomassa.

Entre os principais parâmetros químicos avaliados no carvão vegetal destacam-se o teor de carbono fixo, o teor de materiais voláteis, o teor de cinzas e o poder calorífico. Mendes *et al.* (1982) descrevem esses parâmetros como componentes fundamentais da análise imediata do carvão vegetal, amplamente utilizada para caracterização da qualidade energética do material.

O teor de carbono fixo representa a fração sólida remanescente após a eliminação dos compostos voláteis durante a carbonização. Protásio *et al.* (2013) destacam que esse parâmetro está diretamente relacionado ao grau de carbonização da biomassa e à concentração de carbono na matriz carbonosa residual.

A formação do carbono fixo ocorre em decorrência da degradação térmica dos constituintes lignocelulósicos da madeira e da reorganização estrutural da matriz carbonosa durante a pirólise. Neves *et al.* (2011) observaram que temperaturas mais elevadas favorecem maior eliminação de hidrogênio e oxigênio da biomassa, aumentando proporcionalmente a concentração de carbono no carvão vegetal produzido.

O teor de carbono fixo apresenta forte relação com o desempenho energético do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) argumentam que carvões com maiores concentrações de carbono fixo geralmente apresentam maior estabilidade térmica e melhor desempenho em processos siderúrgicos que demandam elevada capacidade redutora.

Outro parâmetro químico amplamente utilizado na avaliação do carvão vegetal corresponde ao teor de materiais voláteis. Mendes *et al.* (1982) descrevem os materiais voláteis como a fração do carvão liberada na forma de gases e vapores quando o material é submetido a aquecimento em condições controladas.

A quantidade de materiais voláteis presentes no carvão vegetal depende diretamente da intensidade das transformações térmicas ocorridas durante a carbonização. Protásio *et al.* (2013) observam que carbonizações conduzidas em temperaturas mais baixas tendem a resultar em carvão com maiores teores de compostos voláteis devido à degradação térmica incompleta da biomassa.

A relação entre teor de carbono fixo e materiais voláteis constitui importante indicador do grau de carbonização do carvão vegetal. Neves *et al.* (2011) destacam que esses parâmetros apresentam comportamento inversamente proporcional, de modo que o aumento do teor de carbono fixo normalmente está associado à redução da quantidade de materiais voláteis presentes no material.

A presença de materiais voláteis influencia diretamente a reatividade térmica do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) argumentam que carvões com maiores teores de voláteis geralmente apresentam maior facilidade de ignição e maior velocidade de combustão, embora possam apresentar menor estabilidade térmica em determinadas aplicações industriais.

O teor de cinzas representa outro parâmetro químico relevante na caracterização do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) descrevem as cinzas como a fração mineral não combustível remanescente após a combustão completa do material carbonizado.

A composição mineral da biomassa exerce influência direta sobre o teor de cinzas do carvão vegetal produzido. Neves *et al.* (2011) observam que os minerais presentes naturalmente na madeira permanecem concentrados após a carbonização, uma vez que a degradação térmica remove predominantemente os componentes orgânicos da biomassa.

Elevados teores de cinzas geralmente são considerados indesejáveis em aplicações energéticas e siderúrgicas. Protásio *et al.* (2013) destacam que a presença excessiva de materiais minerais reduz o poder calorífico do carvão vegetal e pode comprometer a eficiência térmica e operacional dos processos industriais.

Além de reduzir a concentração energética do carvão vegetal, as cinzas também podem interferir no comportamento térmico do material durante sua utilização industrial. Assis *et al.* (2012) relatam que determinados minerais presentes nas cinzas podem alterar a reatividade do carvão vegetal e influenciar a formação de resíduos durante processos de combustão e redução metalúrgica.

O poder calorífico constitui uma das principais propriedades químicas associadas ao desempenho energético do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) definem o poder calorífico como a quantidade de energia liberada durante a combustão completa do material, representando importante indicador do potencial energético do carvão vegetal.

O poder calorífico está diretamente relacionado à composição química da matriz carbonosa. Protásio *et al.* (2013) observam que carvões com maiores teores de carbono fixo e menores concentrações de cinzas tendem a apresentar maior capacidade de liberação de energia durante a combustão.

As condições operacionais da carbonização exercem forte influência sobre o poder calorífico do carvão vegetal. Neves *et al.* (2011) destacam que temperaturas mais elevadas favorecem aumento da concentração de carbono e redução dos compostos oxigenados da biomassa, contribuindo para elevação do conteúdo energético do material carbonizado.

Parte da literatura aponta que as propriedades químicas do carvão vegetal apresentam forte interdependência entre si. Assis *et al.* (2012) argumentam que alterações nas condições operacionais da carbonização frequentemente modificam simultaneamente teor de carbono fixo, materiais voláteis, teor de cinzas e poder calorífico, dificultando a análise isolada de cada parâmetro químico.

As divergências observadas entre diferentes estudos frequentemente estão relacionadas às características específicas da matéria-prima e às condições experimentais utilizadas na carbonização. Mendes *et al.* (1982) destacam que diferenças na espécie florestal, na temperatura final da pirólise e na metodologia analítica empregada podem influenciar significativamente os resultados das análises químicas do carvão vegetal.

Além disso, alguns autores ressaltam que a avaliação da qualidade química do carvão vegetal deve considerar simultaneamente as exigências específicas das diferentes aplicações industriais. Protásio *et al.* (2013) observam que determinados setores podem priorizar características distintas, como maior teor de carbono fixo, maior reatividade ou menores concentrações de cinzas, conforme as necessidades operacionais do processo industrial envolvido.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se à relação entre rendimento gravimétrico e qualidade química do carvão vegetal. Neves *et al.* (2011) argumentam que processos conduzidos com objetivo exclusivo de maximização do rendimento podem resultar em carvão com maiores teores de materiais voláteis e menor estabilidade térmica, evidenciando o equilíbrio necessário entre eficiência produtiva e qualidade química do produto final.

Nesse contexto, as propriedades químicas do carvão vegetal refletem diretamente a intensidade das transformações térmicas ocorridas durante a carbonização da biomassa florestal. Parâmetros como teor de carbono fixo, materiais voláteis, teor de cinzas e poder calorífico apresentam forte relação com as características da matéria-prima e com as condições operacionais do processo, influenciando simultaneamente o desempenho energético, a estabilidade térmica e a qualidade industrial do carvão vegetal produzido.

4.3.1 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo constitui uma das principais propriedades químicas utilizadas na avaliação da qualidade do carvão vegetal, estando diretamente relacionado ao grau de carbonização da biomassa e ao potencial energético do material produzido. Esse parâmetro representa a fração sólida rica em carbono remanescente após a eliminação dos materiais voláteis durante a pirólise, sendo amplamente utilizado como indicador da eficiência térmica do processo de carbonização. Mendes *et al.* (1982) destacam que o teor de carbono fixo apresenta elevada importância na caracterização do carvão vegetal devido à sua relação direta com o desempenho energético e industrial do produto.

No contexto da utilização do carvão vegetal em processos siderúrgicos e energéticos, o teor de carbono fixo assume papel estratégico por influenciar diretamente a estabilidade térmica, a capacidade redutora e o poder calorífico do material carbonizado. Assis *et al.* (2012) observam que carvões com maiores concentrações de carbono fixo geralmente apresentam melhor desempenho em aplicações industriais que demandam elevada eficiência energética e estabilidade química durante a combustão ou redução metalúrgica.

O carbono fixo é formado a partir das transformações térmicas dos constituintes lignocelulósicos da madeira durante a carbonização. Protásio *et al.* (2014) relatam que a degradação térmica da hemicelulose, da celulose e da lignina promove eliminação progressiva de compostos ricos em hidrogênio e oxigênio, favorecendo a concentração de carbono na matriz carbonosa residual.

A formação do carbono fixo está diretamente relacionada ao grau de intensidade das reações de pirólise ocorridas durante a carbonização. Mendes *et al.* (1982) descrevem que o aumento da temperatura provoca reorganização estrutural da biomassa e favorece formação de estruturas aromáticas condensadas, responsáveis pela estabilidade química do carvão vegetal.

As condições operacionais da carbonização exercem forte influência sobre o teor de carbono fixo do carvão vegetal produzido. Assis *et al.* (2012) destacam que variáveis como temperatura final, taxa de aquecimento, tempo de residência e disponibilidade de oxigênio interferem diretamente na intensidade das transformações térmicas da biomassa.

A temperatura final da carbonização é frequentemente apontada como o principal fator associado ao aumento do teor de carbono fixo. Protásio *et al.* (2014) observaram que temperaturas mais elevadas favorecem maior eliminação de compostos voláteis e promovem maior concentração de carbono na estrutura residual do carvão vegetal.

O aumento do teor de carbono fixo ocorre simultaneamente à redução dos teores de hidrogênio e oxigênio presentes na biomassa original. Mendes *et al.* (1982) argumentam que as reações de desidratação, descarboxilação e desvolatilização intensificadas pelo aquecimento

promovem progressiva concentração do carbono na matriz carbonosa formada durante a pirólise.

A relação entre teor de carbono fixo e materiais voláteis apresenta comportamento inversamente proporcional. Assis *et al.* (2012) destacam que carvões submetidos a carbonizações mais intensas geralmente apresentam menores concentrações de compostos voláteis e maiores teores de carbono fixo, condição frequentemente associada à maior estabilidade térmica do material.

Além das condições operacionais, as características da matéria-prima também influenciam significativamente o teor de carbono fixo do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2014) relatam que madeiras com maiores teores de lignina tendem a produzir carvão com maior concentração de carbono fixo devido à elevada estabilidade térmica e à natureza aromática desse componente lignocelulósico.

A densidade da madeira também pode interferir na formação do carbono fixo durante a carbonização. Mendes *et al.* (1982) observam que biomassa com maior densidade básica frequentemente apresenta maior concentração de material lignocelulósico por unidade de volume, favorecendo formação de matriz carbonosa mais compacta e rica em carbono.

O teor de carbono fixo apresenta forte relação com o poder calorífico do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) argumentam que maiores concentrações de carbono geralmente resultam em maior capacidade de liberação de energia durante a combustão, tornando esse parâmetro particularmente relevante para aplicações energéticas e siderúrgicas.

A estabilidade térmica do carvão vegetal também está diretamente associada ao teor de carbono fixo. Protásio *et al.* (2014) destacam que carvões com maior grau de carbonização tendem a apresentar menor reatividade inicial e maior resistência à degradação térmica, características importantes em processos industriais de alta temperatura.

Entretanto, parte da literatura aponta que elevados teores de carbono fixo nem sempre estão associados ao melhor desempenho global do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) observam que carbonizações excessivamente severas podem reduzir significativamente o rendimento gravimétrico do processo devido ao aumento das perdas de massa durante a pirólise.

A relação entre teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico constitui uma das principais discussões relacionadas à eficiência da carbonização. Assis *et al.* (2012) argumentam que processos conduzidos em temperaturas muito elevadas frequentemente resultam em carvão com excelente qualidade química, porém com menor quantidade final de material produzido.

Além disso, alguns autores destacam que a interpretação isolada do teor de carbono fixo pode não representar adequadamente a qualidade global do carvão vegetal. Protásio *et al.*

(2014) ressaltam que esse parâmetro deve ser analisado conjuntamente com teor de materiais voláteis, teor de cinzas e propriedades físicas do carvão vegetal.

As divergências observadas entre diferentes estudos frequentemente estão relacionadas às diferenças nas condições operacionais da carbonização e às características específicas da biomassa utilizada. Mendes *et al.* (1982) destacam que variações na espécie florestal, no tipo de forno e na metodologia analítica podem influenciar significativamente os resultados obtidos para teor de carbono fixo.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se à influência do controle operacional sobre a uniformidade do carbono fixo presente no carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) observam que sistemas de carbonização com baixa estabilidade térmica tendem a produzir carvão com elevada variabilidade química, resultando em diferenças significativas de carbono fixo entre diferentes regiões da mesma carga carbonizada.

Parte da literatura também ressalta que as exigências industriais influenciam a importância atribuída ao teor de carbono fixo. Protásio *et al.* (2014) argumentam que aplicações siderúrgicas geralmente demandam carvões com elevada concentração de carbono devido à necessidade de maior eficiência redutora e estabilidade térmica nos processos metalúrgicos.

Nesse contexto, o teor de carbono fixo representa uma das principais propriedades químicas associadas à qualidade energética e industrial do carvão vegetal. Sua formação depende diretamente das transformações térmicas ocorridas durante a carbonização da biomassa florestal e da interação entre características da matéria-prima e condições operacionais do processo, influenciando simultaneamente estabilidade térmica, poder calorífico e desempenho do carvão vegetal em diferentes aplicações industriais.

4.3.2 Teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis constitui uma das principais propriedades químicas utilizadas na caracterização do carvão vegetal, estando diretamente relacionado ao grau de carbonização da biomassa e à intensidade das transformações térmicas ocorridas durante a pirólise. Esse parâmetro representa a fração do carvão liberada na forma de gases e vapores quando o material é submetido a aquecimento em condições controladas, refletindo a presença residual de compostos orgânicos termicamente instáveis na matriz carbonosa. Neves *et al.* (2011) destacam que o teor de materiais voláteis apresenta forte relação com a estabilidade térmica e com o comportamento energético do carvão vegetal em diferentes aplicações industriais.

No contexto da produção de carvão vegetal para fins energéticos e siderúrgicos, o teor de materiais voláteis assume elevada importância devido à sua influência sobre reatividade, ignição e eficiência térmica do material carbonizado. Brito *et al.* (1984) observam que a quantidade de compostos voláteis presentes no carvão vegetal interfere diretamente na dinâmica de combustão e no desempenho operacional do material durante sua utilização industrial.

Os materiais voláteis são formados principalmente por compostos orgânicos remanescentes da degradação incompleta da biomassa durante a carbonização. Campos (2008) descreve que esses compostos incluem hidrocarbonetos leves, vapores orgânicos, gases combustíveis e substâncias oxigenadas que permanecem adsorvidas ou incorporadas à estrutura carbonosa do carvão vegetal após a pirólise.

A quantidade de materiais voláteis presentes no carvão vegetal depende diretamente das condições operacionais da carbonização. Neves *et al.* (2011) relatam que temperatura final, taxa de aquecimento, tempo de residência e disponibilidade de oxigênio influenciam significativamente a intensidade da degradação térmica da biomassa e, consequentemente, a concentração de compostos voláteis remanescentes no carvão produzido.

A temperatura final da carbonização constitui o principal fator associado à redução do teor de materiais voláteis. Brito *et al.* (1984) argumentam que temperaturas mais elevadas favorecem maior eliminação dos compostos orgânicos termicamente instáveis da matriz carbonosa, reduzindo progressivamente a quantidade de substâncias voláteis presentes no carvão vegetal.

A relação entre temperatura de carbonização e materiais voláteis está diretamente associada à intensidade das reações de pirólise. Campos (2008) destaca que o aumento da temperatura promove maior degradação dos constituintes lignocelulósicos da madeira e favorece a remoção de compostos ricos em hidrogênio e oxigênio, contribuindo para formação de carvão mais estável quimicamente.

O teor de materiais voláteis apresenta comportamento inversamente proporcional ao teor de carbono fixo do carvão vegetal. Neves *et al.* (2011) observam que carvões submetidos a carbonizações mais intensas geralmente apresentam maiores concentrações de carbono fixo e menores teores de compostos voláteis, refletindo maior grau de carbonização da biomassa.

A presença de materiais voláteis influencia diretamente a reatividade térmica do carvão vegetal. Brito *et al.* (1984) relatam que carvões com maiores teores de voláteis tendem a apresentar maior facilidade de ignição e maior velocidade de combustão devido à rápida liberação desses compostos durante o aquecimento inicial do material.

Essa maior reatividade pode representar vantagem em determinadas aplicações energéticas que demandam combustão rápida e elevada capacidade de ignição. Campos (2008) argumenta que carvões com maiores concentrações de materiais voláteis frequentemente apresentam comportamento térmico mais ativo durante processos de combustão direta.

Entretanto, parte da literatura ressalta que elevados teores de materiais voláteis podem comprometer a estabilidade térmica do carvão vegetal em aplicações industriais de alta temperatura. Neves *et al.* (2011) destacam que processos siderúrgicos geralmente demandam carvão com menores concentrações de compostos voláteis, devido à necessidade de maior estabilidade estrutural e química durante a redução metalúrgica.

A presença excessiva de materiais voláteis também pode interferir na eficiência energética do carvão vegetal. Brito *et al.* (1984) observam que carvões com baixos níveis de carbonização frequentemente apresentam menor concentração de carbono fixo e menor poder calorífico, reduzindo o aproveitamento energético do material.

Além das condições operacionais, as características da matéria-prima também influenciam o teor de materiais voláteis do carvão vegetal produzido. Campos (2008) relata que diferenças na composição química da madeira, especialmente nos teores de lignina e extrativos, podem modificar o comportamento térmico da biomassa durante a pirólise e alterar a quantidade de compostos voláteis remanescentes após a carbonização.

A estabilidade operacional do sistema de carbonização também exerce influência significativa sobre a uniformidade do teor de materiais voláteis presente no carvão vegetal. Neves *et al.* (2011) destacam que sistemas com baixo controle térmico frequentemente produzem carvão heterogêneo, apresentando diferentes níveis de carbonização e elevada variabilidade química dentro da mesma carga carbonizada.

A entrada descontrolada de oxigênio durante a carbonização pode modificar significativamente o comportamento dos materiais voláteis no interior do forno. Brito *et al.* (1984) argumentam que a combustão parcial da biomassa e dos gases da pirólise altera a dinâmica térmica do processo, afetando simultaneamente o teor de voláteis e a formação da matriz carbonosa residual.

Parte da literatura aponta que o equilíbrio entre materiais voláteis e carbono fixo constitui um dos principais desafios relacionados à otimização da qualidade do carvão vegetal. Campos (2008) observa que carbonizações conduzidas em temperaturas muito elevadas reduzem significativamente os compostos voláteis, porém podem provocar redução do rendimento gravimétrico devido à intensificação das perdas de massa da biomassa.

As divergências observadas entre diferentes estudos frequentemente estão relacionadas às diferenças metodológicas utilizadas na determinação do teor de materiais voláteis e às condições específicas de carbonização adotadas nos experimentos. Neves *et al.* (2011) ressaltam que fatores como taxa de aquecimento, tipo de forno e espécie florestal utilizada podem influenciar significativamente os resultados obtidos nas análises químicas do carvão vegetal.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se à forte interação entre teor de materiais voláteis, reatividade e resistência mecânica do carvão vegetal. Brito *et al.* (1984) observam que carvões menos carbonizados geralmente apresentam maior reatividade térmica, porém podem possuir menor estabilidade estrutural e maior suscetibilidade à fragmentação durante o uso industrial.

Além disso, alguns autores destacam que a interpretação isolada do teor de materiais voláteis pode não representar adequadamente a qualidade global do carvão vegetal. Campos (2008) argumenta que esse parâmetro deve ser analisado conjuntamente com teor de carbono fixo, teor de cinzas e propriedades físicas do carvão vegetal, devido à forte interdependência existente entre esses fatores.

Nesse contexto, o teor de materiais voláteis representa importante propriedade química associada ao grau de carbonização da biomassa e ao comportamento térmico do carvão vegetal. Sua concentração depende diretamente das condições operacionais da pirólise e das características da matéria-prima utilizada, influenciando simultaneamente reatividade, estabilidade térmica, poder calorífico e desempenho industrial do carvão vegetal produzido.

4.3.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas constitui uma das principais propriedades químicas utilizadas na avaliação da qualidade do carvão vegetal, estando diretamente relacionado à fração mineral não combustível presente no material carbonizado. Esse parâmetro representa os resíduos inorgânicos remanescentes após a combustão completa do carvão vegetal, sendo amplamente empregado como indicador da pureza energética e da composição mineral da biomassa utilizada na carbonização. Lana *et al.* (2016) destacam que o teor de cinzas apresenta elevada relevância na caracterização química do carvão vegetal devido à sua influência sobre o desempenho energético e industrial do material.

No contexto da utilização do carvão vegetal em processos energéticos e siderúrgicos, o teor de cinzas assume importância significativa por interferir diretamente na eficiência térmica,

na geração de resíduos e na qualidade operacional dos sistemas industriais. Mendes *et al.* (1982) observam que elevados teores de cinzas são geralmente considerados indesejáveis, pois reduzem a concentração de material combustível e comprometem o aproveitamento energético do carvão vegetal.

As cinzas são formadas pelos minerais naturalmente presentes na biomassa florestal, incluindo elementos como cálcio, potássio, magnésio, fósforo, sílica e outros compostos inorgânicos absorvidos pelas árvores durante o crescimento. Lana *et al.* (2016) relatam que esses minerais permanecem concentrados na matriz carbonosa após a carbonização, uma vez que os componentes orgânicos da madeira são removidos predominantemente na forma de gases e vapores durante a pirólise.

A composição mineral da madeira constitui o principal fator associado ao teor de cinzas do carvão vegetal produzido. Mendes *et al.* (1982) argumentam que diferenças na espécie florestal, nas condições de solo e no manejo silvicultural influenciam diretamente a quantidade de minerais acumulados na biomassa e, conseqüentemente, no carvão vegetal resultante da carbonização.

As características nutricionais do ambiente de crescimento das árvores também exercem influência significativa sobre o teor de cinzas. Lana *et al.* (2016) observaram que solos com elevada disponibilidade mineral tendem a favorecer maior absorção de nutrientes pelas plantas, aumentando a concentração de elementos inorgânicos presentes na madeira e no carvão vegetal produzido.

Além das características da matéria-prima, as condições operacionais da carbonização podem modificar a concentração relativa das cinzas no carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) destacam que temperaturas mais elevadas promovem maior degradação dos compostos orgânicos da biomassa, reduzindo a massa total do material carbonizado e aumentando proporcionalmente a concentração da fração mineral residual.

O teor de cinzas apresenta relação inversa com a qualidade energética do carvão vegetal. Lana *et al.* (2016) argumentam que o aumento da quantidade de resíduos minerais reduz a concentração de carbono fixo por unidade de massa do material, diminuindo o poder calorífico e a eficiência energética do carvão vegetal.

A presença excessiva de cinzas também interfere no comportamento térmico do carvão durante sua utilização industrial. Mendes *et al.* (1982) observam que minerais presentes na matriz carbonosa podem alterar a dinâmica da combustão e influenciar a transferência de calor em processos siderúrgicos e energéticos.

Em aplicações siderúrgicas, elevados teores de cinzas frequentemente comprometem a eficiência operacional dos processos de redução metalúrgica. Lana *et al.* (2016) destacam que o acúmulo de resíduos minerais pode aumentar a formação de escórias e impurezas nos sistemas industriais, reduzindo a eficiência do processo e elevando a necessidade de limpeza e manutenção dos equipamentos.

A composição química das cinzas também apresenta relevância na avaliação da qualidade do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) relatam que determinados minerais podem exercer influência mais significativa sobre o comportamento térmico do material, dependendo de sua concentração e da natureza química dos compostos presentes na biomassa.

Parte da literatura aponta que pequenas concentrações de minerais específicos podem atuar como catalisadores de determinadas reações térmicas durante a combustão do carvão vegetal. Lana *et al.* (2016) observam que alguns elementos minerais podem modificar a reatividade do carvão e interferir na velocidade das reações de oxidação e gaseificação do material carbonizado.

Entretanto, a maioria dos estudos associa elevados teores de cinzas à redução da qualidade energética e industrial do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) argumentam que a presença excessiva de materiais minerais reduz a eficiência da combustão e aumenta a geração de resíduos sólidos durante o aproveitamento energético do carvão.

Além da matéria-prima e das condições operacionais, fatores relacionados ao processamento e manuseio da biomassa também podem influenciar o teor de cinzas do carvão vegetal. Lana *et al.* (2016) destacam que contaminações externas provenientes de solo, areia e partículas minerais aderidas à madeira podem elevar artificialmente a quantidade de cinzas presente no material carbonizado.

A estabilidade operacional da carbonização também interfere na uniformidade do teor de cinzas do carvão vegetal produzido. Mendes *et al.* (1982) observam que sistemas de carbonização com controle térmico inadequado frequentemente produzem carvão heterogêneo, apresentando diferenças químicas significativas entre diferentes regiões da mesma carga carbonizada.

Parte das divergências observadas entre diferentes estudos está relacionada às metodologias utilizadas na determinação do teor de cinzas. Lana *et al.* (2016) ressaltam que variações nas condições analíticas, especialmente temperatura e tempo de calcinação, podem influenciar significativamente os resultados obtidos na análise química do carvão vegetal.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se à interação entre o teor de cinzas e outras propriedades químicas do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) argumentam que o

aumento da concentração mineral geralmente ocorre simultaneamente à redução relativa da fração orgânica combustível, afetando parâmetros como teor de carbono fixo, materiais voláteis e poder calorífico.

Além disso, alguns autores destacam que a interpretação isolada do teor de cinzas pode não representar adequadamente a qualidade global do carvão vegetal. Lana *et al.* (2016) observam que a avaliação química do material deve considerar conjuntamente composição mineral, propriedades energéticas e exigências específicas das aplicações industriais às quais o carvão será destinado.

As exigências relacionadas ao teor de cinzas variam conforme o setor consumidor do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) relatam que aplicações siderúrgicas geralmente demandam carvão com baixos níveis de resíduos minerais devido à necessidade de elevada pureza química e maior eficiência redutora durante os processos metalúrgicos.

Nesse contexto, o teor de cinzas representa importante propriedade química associada à composição mineral da biomassa florestal e à qualidade energética do carvão vegetal produzido. Sua concentração depende diretamente das características da matéria-prima, das condições operacionais da carbonização e do nível de contaminação mineral do sistema produtivo, influenciando simultaneamente poder calorífico, eficiência térmica, geração de resíduos e desempenho industrial do carvão vegetal.

4.3.4 Poder calorífico

O poder calorífico constitui uma das principais propriedades químicas utilizadas para avaliação do potencial energético do carvão vegetal, representando a quantidade de energia liberada durante a combustão completa do material. Esse parâmetro está diretamente relacionado à composição química da matriz carbonosa e à concentração de compostos combustíveis presentes no carvão vegetal, sendo amplamente empregado como indicador da eficiência energética do produto. Protásio *et al.* (2013) destacam que o poder calorífico representa um dos principais critérios de qualidade do carvão vegetal devido à sua relação direta com o desempenho energético e industrial do material carbonizado.

No contexto da utilização do carvão vegetal em processos siderúrgicos e energéticos, o poder calorífico assume elevada importância por influenciar diretamente a eficiência térmica dos sistemas industriais. Mendes *et al.* (1982) observam que materiais com maior capacidade de liberação de energia apresentam melhor desempenho em aplicações que demandam elevada geração de calor e estabilidade térmica durante a combustão.

O poder calorífico do carvão vegetal resulta das transformações químicas ocorridas durante a carbonização da biomassa lignocelulósica. Assis *et al.* (2012) relatam que a degradação térmica da madeira promove eliminação progressiva de compostos ricos em hidrogênio e oxigênio, favorecendo a concentração de carbono na matriz carbonosa e aumentando o conteúdo energético do material produzido.

A composição química do carvão vegetal exerce influência direta sobre seu poder calorífico. Protásio *et al.* (2013) argumentam que maiores concentrações de carbono fixo geralmente estão associadas a maiores valores de poder calorífico, devido à elevada capacidade energética dos compostos carbonosos presentes na estrutura do carvão vegetal.

A relação entre carbono fixo e poder calorífico está associada ao grau de carbonização da biomassa. Mendes *et al.* (1982) destacam que carbonizações conduzidas em temperaturas mais elevadas favorecem formação de estruturas aromáticas condensadas e maior concentração de carbono na matriz residual, aumentando a quantidade de energia liberada durante a combustão do carvão vegetal.

Além do teor de carbono fixo, o teor de materiais voláteis também influencia o comportamento energético do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) observam que carvões com maiores concentrações de compostos voláteis frequentemente apresentam maior facilidade de ignição, embora nem sempre apresentam maior estabilidade térmica ou maior conteúdo energético total.

As condições operacionais da carbonização exercem forte influência sobre o poder calorífico do carvão vegetal produzido. Protásio *et al.* (2013) relatam que temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de residência modificam significativamente a intensidade das transformações térmicas da biomassa, alterando simultaneamente teor de carbono fixo, materiais voláteis e composição energética do material carbonizado.

A temperatura final da carbonização é frequentemente apontada como um dos principais fatores relacionados ao aumento do poder calorífico do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) argumentam que temperaturas mais elevadas promovem maior eliminação de compostos oxigenados da biomassa e favorecem formação de carvão mais rico em carbono, elevando sua capacidade de geração de energia durante a combustão.

Entretanto, parte da literatura ressalta que carbonizações excessivamente severas podem comprometer outros parâmetros de qualidade do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) destacam que o aumento do poder calorífico frequentemente ocorre acompanhado da redução do rendimento gravimétrico, devido à intensificação das perdas de massa durante a pirólise.

O teor de cinzas também apresenta relação direta com o poder calorífico do carvão vegetal. Protásio *et al.* (2013) observam que elevadas concentrações de materiais minerais reduzem a fração combustível da matriz carbonosa, diminuindo a quantidade de energia liberada durante a combustão do material.

A influência das cinzas sobre o poder calorífico está associada à presença de componentes não combustíveis na estrutura do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) relatam que minerais presentes na biomassa permanecem concentrados após a carbonização e não contribuem para geração de energia térmica durante a combustão.

As características da matéria-prima também interferem significativamente no poder calorífico do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) destacam que madeiras com maiores teores de lignina tendem a produzir carvão com maior concentração de carbono fixo e maior potencial energético devido à elevada estabilidade térmica e ao caráter aromático desse componente lignocelulósico.

A densidade da biomassa utilizada na carbonização também pode influenciar o conteúdo energético do carvão vegetal produzido. Protásio *et al.* (2013) observam que madeiras mais densas frequentemente originam carvão com maior concentração de material carbonoso por unidade de volume, favorecendo aumento da densidade energética do produto final.

Parte da literatura aponta que o poder calorífico apresenta forte relação com o desempenho industrial do carvão vegetal em processos siderúrgicos. Mendes *et al.* (1982) argumentam que materiais com maior conteúdo energético permitem maior eficiência térmica nos sistemas industriais, reduzindo consumo de combustível e aumentando a estabilidade operacional dos processos de redução metalúrgica.

Além do conteúdo energético, o poder calorífico também influencia a viabilidade econômica da produção de carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) destacam que carvões com maior capacidade de geração de energia tendem a apresentar maior valor agregado em aplicações industriais que demandam elevada eficiência térmica.

As divergências observadas entre diferentes estudos frequentemente estão relacionadas às diferenças metodológicas utilizadas na determinação do poder calorífico e às condições específicas da carbonização. Protásio *et al.* (2013) ressaltam que variações na espécie florestal, na umidade do carvão e na metodologia de análise calorimétrica podem influenciar significativamente os resultados obtidos.

Outro aspecto frequentemente discutido refere-se à relação entre poder calorífico e estabilidade térmica do carvão vegetal. Mendes *et al.* (1982) observam que materiais altamente

carbonizados geralmente apresentam maior conteúdo energético, porém podem apresentar menor reatividade inicial durante processos de combustão.

Além disso, alguns autores destacam que o poder calorífico não deve ser interpretado isoladamente como único indicador de qualidade do carvão vegetal. Assis *et al.* (2012) argumentam que propriedades como teor de cinzas, resistência mecânica, porosidade e teor de materiais voláteis também influenciam significativamente o desempenho energético e operacional do material.

Parte da literatura também ressalta que a eficiência energética do carvão vegetal depende não apenas do conteúdo energético intrínseco do material, mas também das condições de utilização industrial. Protásio *et al.* (2013) observam que fatores como granulometria, estabilidade estrutural e homogeneidade química podem modificar o aproveitamento efetivo da energia contida no carvão vegetal durante sua utilização.

Nesse contexto, o poder calorífico representa uma das principais propriedades químicas associadas ao potencial energético do carvão vegetal. Sua magnitude depende diretamente das transformações químicas ocorridas durante a carbonização da biomassa florestal e da interação entre composição química, condições operacionais e características da matéria-prima, influenciando simultaneamente eficiência térmica, desempenho industrial e qualidade energética do carvão vegetal produzido.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu reunir e discutir informações da literatura científica sobre os principais parâmetros físico-químicos utilizados na caracterização do carvão vegetal. A análise dos estudos selecionados evidenciou que as propriedades físicas e químicas constituem importantes indicadores da qualidade do material, fornecendo informações relevantes sobre suas características estruturais e energéticas.

Entre as propriedades físicas, destacam-se a densidade, a porosidade, a resistência mecânica e a friabilidade, parâmetros que influenciam diretamente a estabilidade, a integridade e o comportamento do carvão vegetal durante seu manuseio e utilização. Já entre as propriedades químicas, os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, além do poder calorífico, são amplamente empregados na avaliação da qualidade do produto, uma vez que estão associados ao seu desempenho energético.

A literatura consultada demonstra que a caracterização físico-química do carvão vegetal é fundamental para a compreensão de suas propriedades e para a avaliação de sua qualidade. De modo geral, carvões vegetais com maiores teores de carbono fixo e menores teores de cinzas tendem a apresentar características mais adequadas para aplicações energéticas, enquanto propriedades físicas adequadas contribuem para a manutenção da qualidade do material durante armazenamento, transporte e utilização.

Dessa forma, conclui-se que os parâmetros físico-químicos representam ferramentas essenciais para a caracterização e avaliação da qualidade do carvão vegetal, contribuindo para o entendimento das características que influenciam seu desempenho e sua utilização.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, M. R. *et al.* Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291–302, 2012.
Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/74826/1/PFB-Qualidade.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2026.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.
Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/229227306_Review_of_fast_pyrolysis_of_biomass_and_product_upgrading. Acesso em: 03 abr. 2026.
- BRITO, J. O. *et al.* Estudo do comportamento de madeiras de eucalipto frente ao processo de destilação seca. **Boletim Técnico IPEF**, n. 8, 1984.
Disponível em: <https://ru.dgb.unam.mx/items/6c7cf9b7-3469-4384-a06f-5255804b0ee3>. Acesso em: 03 abr. 2026.
- CAMPOS, A. C. M. **Carvão de Eucalyptus**: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.
Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/server/api/core/bitstreams/83658dad-846e-46b8-8252-29d168fd796b/content>. Acesso em: 03 abr. 2026.
- 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, 2015.
Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr108/cap07.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2026.
- LANA, A. Q. *et al.* Comparison of procedures for immediate chemical analysis of charcoal. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 371–376, 2016.
Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000200020>. Acesso em: 03 abr. 2026.
- MENDES, M. G. *et al.* **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982.
Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/records/6473610308fd68d546041ee6>. Acesso em: 03 abr. 2026.
- MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. **Energy & Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006.
Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef0502397>. Acesso em: 03 abr. 2026.
- NEVES, T. A. *et al.* Qualidade do carvão vegetal em função de espécies florestais e dos parâmetros de carbonização. 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.
Disponível em: <https://pfb.sede.embrapa.br/pfb/article/view/275/231>. Acesso em: 03 abr. 2026.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita*. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431–439, 2010. Disponível em: <https://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/16468>. Acesso em: 03 abr. 2026.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* **Características de crescimento, madeira e carvão para classificação de clones de Eucalyptus spp. visando o uso energético**. 2016. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufra.edu.br/jspui/bitstream/123456789/726/1/CARACTERISTICAS%20DE%20CRESCIMENTO.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2026.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 465-477, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/wQQppf5QMJc5NnGKqHrrNQP/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 03 abr. 2026.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 113-123, 2013. Disponível em: <https://pfb.sede.embrapa.br/pfb/article/view/448>. Acesso em: 03 abr. 2026.