

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**JÚLIA CRISTINA OLIVEIRA DE SOUZA**

**LEONARDO FURLAN BUENO**

**CARVÃO ATIVADO DA CASCA DO COCO VERDE: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
PARA APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS NA ENGENHARIA QUÍMICA**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

**JÚLIA CRISTINA OLIVEIRA DE SOUZA**

**LEONARDO FURLAN BUENO**

**CARVÃO ATIVADO DA CASCA DO COCO VERDE: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
PARA APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS NA ENGENHARIA QUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção do título  
de Engenharia Química, pela Universidade  
Federal de Alfenas.

Orientadora: Profa. Dra. Melina Savioli Lopes

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Bueno, Leonardo Furlan.

Carvão ativado da casca do coco verde : revisão bibliográfica para aplicações sustentáveis na engenharia química / Leonardo Furlan Bueno, Júlia Cristina Oliveira de Souza. - Poços de Caldas, MG, 2025.

52 f. : il. -

Orientador(a): Melina Savioli Lopes.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Biomassa lignocelulósica. 2. Economia circular. 3. Adsorção. 4. Carvão alternativo. 5. Materiais porosos. I. Souza, Júlia Cristina Oliveira de. II. Lopes, Melina Savioli, orient. III. Título.

**JÚLIA CRISTINA OLIVEIRA DE SOUZA  
LEONARDO FURLAN BUENO**

**CARVÃO ATIVADO DA CASCA DO COCO VERDE: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA  
PARA APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS NA ENGENHARIA QUÍMICA**

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas.

Aprovada em: 02 de Julho de 2025

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Melina Savioli Lopes  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Giselle Patrícia Sancinetti  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Alessandra Regina Pepe Ambrozin  
Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Dedicamos esse Trabalho de Conclusão de Curso à nossa orientadora Dra. Melina Savioli Lopes, pelo incentivo ao desenvolvimento do mesmo, por todo o conhecimento e ajuda fornecida. A todos que desejam obter conhecimento sobre o assunto e o benefício do mesmo para o presente e futuro.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos, em primeiro lugar, à Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas, pela infraestrutura e recursos disponibilizados, que foram fundamentais para o início, desenvolvimento e conclusão deste projeto.

Expressamos nossa profunda gratidão às nossas famílias, pelo apoio incondicional, pela constante dedicação em nos proporcionar as melhores oportunidades, por acreditarem em nossos sonhos e estarem presentes em cada etapa dessa trajetória.

Aos amigos que estiveram ao nosso lado ao longo dessa jornada, nosso sincero agradecimento por tornarem esse período mais leve e especial, compartilhando conosco momentos de alegria e superando juntos os desafios.

Por fim, agradecemos à nossa orientadora, Dra. Melina Savioli Lopes, por sua orientação precisa, disponibilidade e dedicação contínua. Seu apoio foi essencial não apenas na condução deste trabalho, mas também na superação dos obstáculos enfrentados. Sem sua colaboração, este projeto não teria sido possível.

## RESUMO

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos, aliada à necessidade de práticas sustentáveis na engenharia química, impulsiona a busca por soluções que promovam o reaproveitamento de materiais. Neste contexto, a casca do coco verde, um resíduo agroindustrial amplamente disponível no Brasil, mostra-se promissora como matéria-prima para a produção de carvão ativado. Este trabalho teve como objetivo investigar, por meio de revisão bibliográfica, a viabilidade do uso da casca do coco verde na produção de carvão ativado, considerando os diferentes métodos de ativação, suas propriedades físico-químicas e aplicações industriais. Foram analisadas técnicas como pirólise, hidrólise térmica, ativação por micro-ondas e ativação por plasma, destacando suas vantagens, limitações e parâmetros críticos de processo. Os resultados demonstraram que o carvão ativado obtido da casca do coco verde apresenta boa capacidade adsorptiva na remoção de corantes, metais pesados e compostos orgânicos, com desempenho comparável ao carvão comercial em algumas aplicações. Além disso, seu uso representa uma alternativa ambientalmente sustentável e economicamente viável, especialmente em regiões tropicais. Contudo, ainda existem desafios para a aplicação em larga escala, como a logística de coleta do resíduo, variabilidade da matéria-prima e ausência de regulamentações específicas. Conclui-se que a valorização desse resíduo pode contribuir significativamente para a economia circular e a inovação em processos da engenharia química.

**Palavras-chave:** biomassa lignocelulósica; economia circular; adsorção; carvão alternativo; materiais porosos.

## ABSTRACT

The growing generation of urban solid waste, along with the need for sustainable practices in chemical engineering, encourages the search for alternatives that promote material reuse. In this context, the green coconut husk—an agro-industrial residue widely available in Brazil—emerges as a promising raw material for the production of activated carbon. This study aimed to investigate, through a bibliographic review, the feasibility of using green coconut husk to produce activated carbon, considering different activation methods, physicochemical properties, and industrial applications. Techniques such as pyrolysis, thermal hydrolysis, microwave activation, and plasma activation were analyzed, highlighting their advantages, limitations, and critical process parameters. The results showed that activated carbon derived from green coconut husk exhibits good adsorption capacity for removing dyes, heavy metals, and organic compounds, with performance comparable to commercial activated carbon in certain applications. Furthermore, its use represents an environmentally sustainable and economically viable alternative, especially in tropical regions. However, challenges remain for large-scale implementation, such as waste collection logistics, raw material variability, and lack of specific regulations. It is concluded that the valorization of this residue can significantly contribute to the circular economy and innovation in chemical engineering processes.

**Keywords:** lignocellulosic biomass; circular economy; adsorption; alternative coal; porous materials.

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Carvão Ativado
ONU	Organização das Nações Unidas
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
BET	Método de Brunauer-Emmett-Teller (para área superficial)

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	11
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
5.1.	BIOMASSA COMO MATÉRIA-PRIMA.....	13
5.2.	CASCA DO COCO VERDE.....	14
5.3.	CARVÃO ATIVADO.....	16
5.4.	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO.....	20
<b>5.4.1.</b>	<b>Pirólise e etapas do processo</b> .....	<b>21</b>
<b>5.4.2.</b>	<b>Hidrólise Térmica Combinada com Carbonização</b> .....	<b>24</b>
<b>5.4.3.</b>	<b>Ativação com Micro-ondas</b> .....	<b>25</b>
<b>5.4.4.</b>	<b>Ativação por Plasma</b> .....	<b>26</b>
5.5.	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE PRODUÇÃO.....	27
5.6.	PARÂMETROS CRÍTICOS DO PROCESSO.....	29
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>30</b>
6.1.	CAPACIDADE ADSORTIVA.....	30
6.2.	PROCESSOS DE ATIVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO.....	33
6.3.	COMPARAÇÃO COM O CARVÃO ATIVADO COMERCIAL.....	37
6.4.	LIMITAÇÕES E DESAFIOS PARA APLICAÇÃO EM LARGA ESCALA.....	39
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com os impactos ambientais causados pela geração excessiva de resíduos sólidos urbanos impulsiona o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para a reutilização desses materiais. No Brasil, o consumo elevado de coco verde, especialmente em áreas urbanas e turísticas, gera anualmente toneladas de resíduos, sendo a casca do coco verde um dos principais componentes desse volume. Em grande parte dos casos, esse resíduo é descartado de forma inadequada em áreas públicas, rios e ambientes naturais, acarretando poluição do solo e da água, além de afetar a saúde pública (Silva, 2021).

O acúmulo de cascas de coco verde em locais impróprios compromete a estética urbana, prejudica os ecossistemas locais e favorece a proliferação de vetores de doenças. A lenta decomposição da casca do coco verde, devido à sua alta resistência estrutural e composição lignocelulósica, agrava ainda mais o problema da gestão de resíduos. Diante desse cenário, pesquisas têm explorado alternativas para o reaproveitamento da casca do coco verde, sendo a produção de carvão ativado uma proposta promissora para minimizar esses impactos e gerar produtos de alto valor agregado (Oliveira et al., 2020).

O carvão ativado é um material amplamente utilizado em diversas aplicações da engenharia química, como purificação de água, tratamento de efluentes industriais e processos de adsorção de compostos orgânicos e inorgânicos. Tradicionalmente, a produção de carvão ativado utiliza matérias-primas não renováveis, como carvão mineral e madeira, cujos processos de obtenção frequentemente causam degradação ambiental. A substituição dessas fontes por resíduos agroindustriais, como a casca do coco verde, representa uma alternativa sustentável alinhada aos princípios da economia circular e da química verde (Pereira & Souza, 2019).

Considerando a elevada geração de resíduos de casca de coco verde e os desafios associados ao seu descarte adequado, este trabalho propõe a realização de uma análise teórica, por meio de revisão bibliográfica, sobre o aproveitamento da casca do coco verde para a produção de carvão ativado. A pesquisa se baseia na análise de estudos já realizados, buscando reunir e discutir informações sobre os métodos de produção, propriedades físico-químicas do material obtido e suas aplicações na engenharia química (RODRIGUES, 2022).

Dessa forma, este trabalho pretende contribuir para a disseminação do conhecimento sobre alternativas sustentáveis no aproveitamento de resíduos sólidos, promovendo práticas que impulsionam o desenvolvimento sustentável e a inovação tecnológica no campo da engenharia química.

Além disso, este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em seções que buscam apresentar de forma clara e sistemática os principais aspectos relacionados à produção de carvão ativado a partir da casca do coco verde. Na primeira seção, encontra-se a introdução, onde são apresentados o tema, os objetivos e a relevância da pesquisa. A segunda traz o objetivo geral e os específicos de forma mais detalhada. A seção 3 apresenta a justificativa do tema escolhido. A quarta seção apresenta a metodologia, detalhando os critérios adotados para a seleção e análise das fontes bibliográficas utilizadas. A quinta trata da revisão de literatura, abordando os conceitos fundamentais sobre carvão ativado, suas propriedades, métodos de produção, aplicações industriais e, especialmente, o aproveitamento de resíduos agroindustriais como matéria-prima, com ênfase na casca do coco verde. A sexta seção expõe a discussão dos resultados, na qual são analisadas as informações coletadas, destacando os benefícios, desafios e perspectivas do uso da casca do coco verde na produção de carvão ativado. Por fim, a sétima seção traz as considerações finais, sintetizando os principais achados do trabalho, bem como sugestões para estudos futuros.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Investigar o potencial do carvão ativado produzido a partir da casca do coco verde como alternativa sustentável para aplicações na engenharia química.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Buscar novas possibilidades de aproveitamento dos resíduos do coco verde
- Avaliar as propriedades físico-químicas do carvão ativado obtido da casca do coco verde;

- Comparar os efeitos de diferentes métodos de ativação (física e química) sobre as características do material produzido;
- Analisar a eficiência adsortiva do carvão ativado em diferentes aplicações, como no tratamento de efluentes;
- Reduzir lacunas na literatura científica sobre o uso do coco verde como precursor de carvão ativado.

### 3 JUSTIFICATIVA

A escolha deste tema se justifica pela relevância ambiental, social e econômica relacionada à gestão de resíduos sólidos e pela necessidade de promover práticas sustentáveis na indústria. Além disso, ao compilar e analisar os estudos já publicados sobre o uso da casca do coco verde para a produção de carvão ativado, pretende-se fortalecer a conscientização sobre soluções ambientalmente corretas e economicamente viáveis para o reaproveitamento de resíduos.

### 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste Trabalho de Conclusão de Curso baseou-se em uma abordagem teórica, fundamentada na realização de uma revisão bibliográfica. O principal objetivo foi investigar o potencial da casca do coco verde como matéria-prima para a produção de carvão ativado. Para isso, foram analisadas publicações científicas, dissertações e artigos disponíveis em bases de dados reconhecidas, como Scielo, Google Acadêmico e periódicos especializados da área de Engenharia Química.

A busca pelos materiais foi realizada em português e em inglês, utilizando palavras-chave como *carvão ativado*, *casca do coco verde*, *adsorção*, *sustentabilidade*, *engenharia química*, bem como suas respectivas traduções: *activated carbon*, *green coconut husk*, *adsorption*, *sustainability* e *chemical engineering*. A seleção dos materiais considerou critérios como a atualidade (com prioridade para publicações a partir de 2021), relevância para o tema e credibilidade das fontes. Ao todo, foram utilizadas 106 referências para compor um referencial

teórico consistente, que embasasse a discussão e os objetivos propostos neste estudo.

## 5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 5.1. BIOMASSA COMO MATÉRIA-PRIMA

A crescente demanda por soluções sustentáveis na produção de carvão ativado tem direcionado pesquisas para o aproveitamento de resíduos agroindustriais como fontes alternativas. A biomassa, compreendida como toda matéria orgânica composta principalmente por carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio (TSAMBA et al., 2006), apresenta-se como uma alternativa promissora. Essa matéria-prima inclui madeira e seus resíduos, resíduos sólidos urbanos biodegradáveis, resíduos agrícolas e de colheita, e até mesmo dejetos animais.

As biomassas possuem como principais componentes a celulose, hemicelulose e lignina. A celulose é um polímero natural linear formado por unidades de  $\beta$ -D-glicose ligadas por ligações  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4), sendo o principal componente estrutural das paredes celulares vegetais (KLEMM et al., 2018). A hemicelulose é um grupo de polissacarídeos amorfos e heterogêneos, com cadeias curtas e ramificadas de diferentes monossacarídeos (como xilose, arabinose, manose e galactose). Já a lignina é um polímero fenólico tridimensional formado por unidades derivadas do p-coumaril, coniferil e sinapil álcool. Está presente na parede celular secundária das plantas (SUN et al., 2016; RAGAUSKAS et al., 2014). Por apresentar menor grau de polimerização, a hemicelulose é mais suscetível à hidrólise ácida do que a celulose (BRAGA, 2018), enquanto a lignina, presente em proporções que variam de 10 a 40% em massa, confere resistência estrutural à biomassa (OLIVEIRA et al., 2017; YAMAN, 2004). Essa composição contribui diretamente para a eficiência dos processos termoquímicos de conversão, como a pirólise, gaseificação e combustão, sendo a pirólise o principal processo endotérmico responsável pela produção do carvão ativado (FRASSOLDATI et al., 2006).

O uso da biomassa na produção de carvão ativado (CA) exige que o material precursor tenha elevado teor de carbono e baixo conteúdo de minerais inorgânicos, características encontradas em resíduos agrícolas como sementes, caules, caroços e cascas de frutas (LÜTKE et al., 2019). Biomassas com altos teores de carbono fixo

são ideais para a produção de CA, uma vez que esse fator contribui para a formação de poros durante a pirólise e ativação, elevando a área superficial do produto final (HAMZA et al., 2016; AHMAD & IDRIS, 2014). Além disso, durante o processo térmico, observa-se a redução de elementos como hidrogênio, nitrogênio e enxofre, em decorrência da liberação de substâncias voláteis (CHEN et al., 2012). Na literatura, diversos resíduos são citados como precursores viáveis para produção de carvão ativado, tais como casca de acácia negra (LÜTKE et al., 2019), casca de arroz (FU et al., 2019) e caroço de abacate (RODRIGUES et al., 2011).

Entre as biomassas disponíveis, a casca de coco verde se destaca por sua alta disponibilidade em regiões tropicais, especialmente no Brasil, e por sua composição lignocelulósica rica em celulose, hemicelulose e lignina, componentes essenciais para formação de estruturas carbonáceas porosas (SILVA et al., 2021). Estudos indicam que, mesmo com propriedades variáveis, o carvão ativado produzido a partir da casca de coco verde pode atingir áreas superficiais entre 800 e 1200 m<sup>2</sup>/g, com desempenho comparável ao de carvões comerciais em testes de adsorção de corantes, metais pesados e compostos orgânicos (OLIVEIRA et al., 2022).

A aplicação do carvão de coco verde em sistemas de tratamento de efluentes tem mostrado resultados promissores, especialmente na remoção de corantes sintéticos, fármacos e íons metálicos como chumbo (Pb<sup>2+</sup>) e cádmio (Cd<sup>2+</sup>) (FERREIRA et al., 2022). Além disso, seu uso contribui para a redução do volume de resíduos sólidos urbanos, visto que a casca de coco verde pode levar mais de 8 anos para se decompor em aterros (LEITE et al., 2019).

## 5.2. CASCA DO COCO VERDE

A casca do coco verde, resíduo sólido oriundo do consumo crescente de água de coco no Brasil, constitui um desafio ambiental e, ao mesmo tempo, uma promissora fonte de matéria-prima para aplicações sustentáveis. Esse subproduto, formado majoritariamente por fibras e pó presentes no mesocarpo do fruto, representa cerca de 70% a 85% da massa total do coco (BBC BRASIL, 2014; CORREIA et al., 2003). As fibras lignocelulósicas possuem alta resistência mecânica e flexibilidade, além de serem biodegradáveis naturalmente. Já o pó do coco é composto de partículas finas e escuras, com textura semelhante à serragem, além

de ser excelente retentor de umidade (MALI et al., 2018; RAJESH et al., 2017). A composição química, rica em lignina e celulose, classifica a casca do coco como um material lignocelulósico (MATHAI, 2005), com alta rigidez e excelente resistência mecânica, características que ampliam suas possibilidades de reaproveitamento. As porcentagens de cada um dos componentes da casca do coco verde estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição Química da Casca do Coco Verde

Componente	Teor (% em peso seco)
Celulose	33,2
Hemicelulose	29,1
Lignina	25,4
Cinzas	2,3
Extrativos	10,0

Fonte: Adaptado de SANTOS et al. (2021).

A casca do coco é formada essencialmente por fibras curtas e longas agregadas a uma fração pulverulenta, compondo uma estrutura semelhante à da madeira (ROSA et al., 2001; SILVA et al., 2019). Essa semelhança permite sua utilização em processos de carbonização, como na produção de carvão vegetal, sem a necessidade de recorrer ao desmatamento de matas nativas, atividade ainda comum no Brasil (SANTOS; HATAKEYAMA, 2012). A carbonização, nesse contexto, transforma resíduos ricos em carbono, como cascas de frutos, em carvão por decomposição térmica (MORAIS, 2014; AZEVEDO et al., 2020). Tal prática pode gerar fontes de energia sustentável e limpa, inclusive com a produção de carvão ativado e desodorizante (MARTINS et al., 2013).

O Brasil é um dos maiores produtores de coco do mundo, com cerca de 187 mil hectares cultivados e uma produção estimada em 1,93 bilhões de frutos por ano (IBGE, 2023). O consumo do fruto, especialmente no verão, provoca o descarte em massa de cascas em aterros, ruas e beiras de estrada, devido ao baixo índice de

reciclagem (BBC BRASIL, 2014). Estima-se que a casca demore entre 8 a 12 anos para se decompor naturalmente, agravando o problema ambiental (BBC BRASIL, 2014; CARRIJO et al., 2002). Além disso, esse resíduo, ao reter água da chuva, contribui para a proliferação de mosquitos vetores de doenças como a dengue, transformando-se também em questão de saúde pública (BBC BRASIL, 2015; ROSA et al., 2002; SENHORAS, 2004).

Embora grande parte da produção e consumo de coco esteja concentrada no litoral nordestino, onde se localizam 70% da produção nacional (MARTINS e JESUS Jr., 2011), o descarte inadequado é um problema que atinge centros urbanos em todo o país. As possibilidades de reaproveitamento, no entanto, são amplas e crescentes. A fibra extraída do coco verde, por exemplo, tem sido usada como substituta do xaxim em paisagismo, devido à sua alta porosidade e características antifúngicas (ARAGÃO, 2002). Também encontra aplicação nas indústrias moveleira, calçadista, papel e celulose, construção civil, *design* e até na produção de filtros e mantas industriais (MARTINS et al., 2013; FLORENTINO et al., 2011). Além disso, tanto o pó quanto a fibra do mesocarpo são considerados excelentes condicionadores de solo, devido à sua capacidade de retenção de água e aeração (CARRIJO et al., 2002).

Alguns estudos exploraram o uso da fibra para a produção de etanol lignocelulósico, obtido por meio da deslignificação das fibras e conversão em açúcares fermentáveis (CORRADINI et al., 2009; SATIRO et al., 2012). Esse aproveitamento energético da casca pode vir a integrar a cadeia da bioenergia, como já ocorre em países como a Índia, que têm longa tradição no uso de subprodutos do coco (MATHAI, 2005).

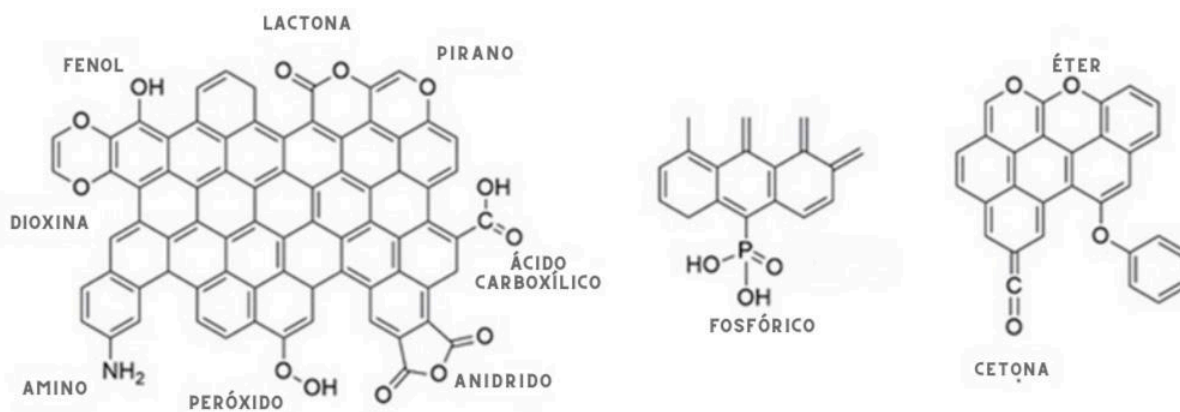
Diante de seu volume expressivo, durabilidade e composição rica em materiais orgânicos e estruturais, a casca do coco verde deixa de ser apenas um resíduo e passa a configurar um recurso estratégico na transição para modelos de economia circular. Além de reduzir os impactos ambientais, seu aproveitamento pode promover inclusão social e geração de renda por meio de cadeias produtivas sustentáveis (APAOLAZA et al., 2005; REDDY e YANG, 2005).

### 5.3. CARVÃO ATIVADO

O carvão ativado é um material carbonáceo altamente poroso, obtido a partir da carbonização de materiais orgânicos ricos em carbono, como madeira, carvão mineral, cascas de frutas e resíduos agroindustriais. Seu principal diferencial está na estrutura interna formada por uma rede complexa de poros, o que proporciona uma área superficial extremamente elevada (podendo ultrapassar 2000 m<sup>2</sup>/g), característica fundamental para os processos de adsorção (SANTOS et al., 2020).

A elevada capacidade adsorptiva do carvão ativado está diretamente relacionada à sua estrutura porosa e à presença de grupos funcionais oxigenados em sua superfície, como carboxilas, fenóis e lactonas que podem ser observadas na Figura 1. Esses grupos são formados durante o processo de ativação e variam de acordo com o precursor utilizado e as condições de tratamento térmico ou químico, desempenhando papel essencial na interação com contaminantes (MORAIS et al., 2021; DIAS et al., 2021). Na Tabela 2 podem ser observadas as funções na adsorção de cada grupo funcional.

Figura 1 - Principais grupos funcionais do carvão ativado



Fonte: Autores, 2025.

Tabela 2 – Grupos Funcionais do Carvão Ativado e sua Função na Adsorção  
(continua)

Grupo Funcional	Função na Adsorção	Referência
Fenol	Participa de interações por ligação de hidrogênio e aumenta a polaridade da superfície.	(FERREIRA, S, et al., 2022)
Dioxina	Contribui com propriedades redox e interações polares.	(SILVA, J, et al., 2021)
Amino	Promove a adsorção de íons metálicos e compostos ácidos por doação de elétrons.	(SILVA, J, et al., 2021)
Peróxido	Responsável por reações redox e aumento da reatividade superficial.	(LIMA, M, et al., 2023)
Lactona	Facilita interações com compostos orgânicos polares, atuando como sítio ácido fraco.	(OLIVEIRA, M, et al., 2022)
Ácido carboxílico	Oferece sítios ácidos para interação com íons básicos e metais pesados.	(FERREIRA, T, et al., 2022)

Tabela 2 – Grupos Funcionais do Carvão Ativado e sua Função na Adsorção  
(conclusão)

Grupo Funcional	Função na Adsorção	Referência
Anidrido	Atua como grupo ácido forte, promovendo interações eletrostáticas.	(SANTOS, L, et al., 2020)
Pirano	Contribui para a estabilidade estrutural e adsorção de compostos aromáticos.	(LIMA, M, et al., 2023)
Fosfórico (ácido fosfórico)	Fornece acidez e potencial para formação de ligações com metais.	(CHEN, X, et al., 2022)
Éter	Aumenta a afinidade por moléculas orgânicas neutras ou apolares.	(SOUZA, M, et al., 2024)
Cetona	Participa na adsorção de compostos polares por interação dipolo-dipolo.	(FU, Y, et al., 2019)

Fonte: Autores, 2025

Os grupos funcionais presentes na figura 1 e tabela 2 aumentam a polaridade da superfície do carvão ativado, permitindo interações químicas, eletrostáticas e, em alguns casos, até reações redox com os poluentes presentes no meio (MORAIS et al., 2021).

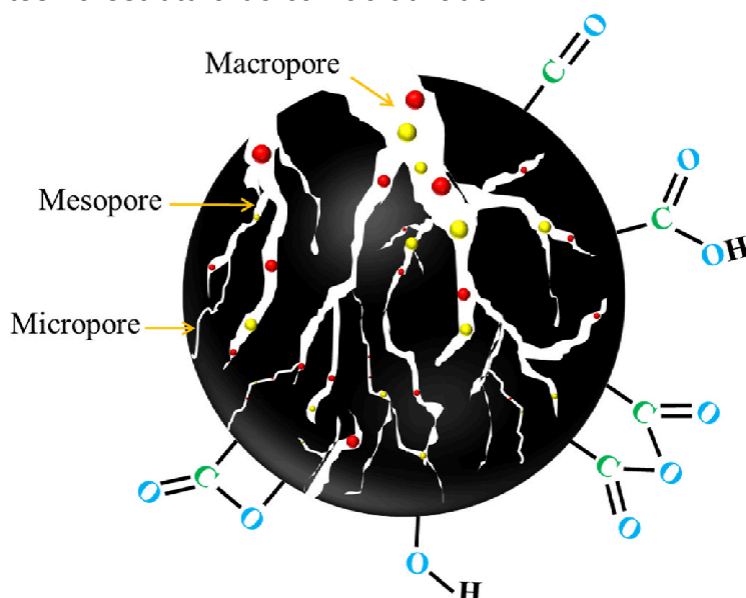
Com base no seu grupo funcional, o carvão ativado atua como um excelente adsorvente físico e químico, sendo capaz de reter gases, vapores, metais pesados, compostos orgânicos voláteis, corantes e uma ampla gama de poluentes presentes em soluções aquosas ou em fase gasosa. Por isso, é amplamente empregado em

diferentes áreas da engenharia química, como no tratamento de águas residuárias, purificação de fluidos industriais, filtros domésticos, indústrias farmacêuticas e alimentícias (SANTOS et al., 2020).

Além de sua aplicação na remoção de contaminantes, o carvão ativado também possui propriedades catalíticas, podendo atuar como suporte de catalisadores em reações químicas, o que amplia ainda mais sua importância nos setores industriais e ambientais (MORAIS et al., 2021).

A estrutura do carvão ativado é composta por microporos (diâmetro < 2 nm), mesoporos (entre 2 e 50 nm) e macroporos (> 50 nm) que podem ser observados na Figura 2, os quais influenciam diretamente sua capacidade adsortiva (SANTOS et al., 2020). Os microporos são os principais responsáveis pela grande área superficial e são ideais para a adsorção de pequenas moléculas. Os mesoporos facilitam o transporte de moléculas maiores, enquanto os macroporos funcionam como canais de acesso para os demais poros internos (MORAIS et al., 2021). A combinação desses diferentes tipos de poros confere ao carvão ativado sua versatilidade e eficiência na remoção de diferentes tipos de contaminantes (SANTOS et al., 2020).

Figura 2 - Representação esquemática dos microporos, mesoporos e macroporos presentes na estrutura do carvão ativado



Fonte: SULTANA et al. (2021).

#### 5.4. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

O processo de produção do carvão ativado a partir de biomassa lignocelulósica tem ganhado destaque devido à sua viabilidade econômica, sustentabilidade e eficiência adsorptiva. A casca do coco verde, rica em lignina, celulose e hemicelulose, é um resíduo agrícola promissor que, quando submetido a processos térmicos adequados, pode gerar carvão ativado com excelente área superficial e porosidade (ALMEIDA et al., 2021).

A produção de carvão ativado a partir da casca do coco verde consiste em um processo termoquímico estruturado em etapas que visam transformar essa biomassa lignocelulósica em um material poroso e funcional para aplicações na engenharia química (MORAIS et al., 2021). Inicialmente, realiza-se a coleta das cascas, seguida da lavagem para remoção de impurezas como solo e resíduos orgânicos (SANTOS et al., 2021). Após isso, a biomassa é seca ao sol ou em estufa a cerca de 105 °C para a eliminação da umidade (OLIVEIRA et al., 2022). Em seguida, a casca é triturada em partículas menores. Cada uma dessas etapas será discutida detalhadamente nas seções seguintes, a fim de aprofundar a compreensão dos processos envolvidos.

#### **5.4.1. Pirólise e etapas do processo**

O processo de obtenção do carvão ativado inicia-se com a pirólise, ou carbonização, que consiste na decomposição térmica do material em ausência ou com baixa concentração de oxigênio, geralmente entre 300 °C e 700 °C. Nessa etapa, os componentes voláteis da biomassa são eliminados, restando um resíduo carbonáceo sólido com estrutura porosa incipiente (SANTOS et al., 2020). O produto obtido é o carvão carbonizado, também chamado de carvão pré-ativado (SANTOS et al., 2021).

Após a pirólise, o material carbonizado pode ser ativado por dois métodos principais: ativação física ou química. Na ativação física, o precursor é primeiro carbonizado em atmosfera inerte (geralmente com nitrogênio) e, em seguida, ativado com vapor d'água ou dióxido de carbono a temperaturas entre 800 °C e 1000 °C, o que desenvolve a porosidade (SANTOS et al., 2020). Já a ativação química é feita impregnando o material com agentes como ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), hidróxido de potássio (KOH) ou cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ), seguida de aquecimento entre 400 °C e 700 °C, resultando em rendimentos maiores e desenvolvimento mais eficiente de

microporos (MORAIS et al., 2021). A comparação entre a ativação química e física está descrita na Tabela 4. Esse método também permite ativação em temperaturas mais baixas e é ideal para materiais lignocelulósicos (SANTOS et al., 2020).

Após a ativação química, o carvão ativado é lavado com água destilada ou soluções ácidas até alcançar pH neutro, para remoção dos resíduos químicos (SANTOS et al., 2021). Finalmente, é submetido à secagem em estufa (cerca de 110 °C), moído e classificado de acordo com a granulometria desejada (MORAIS et al., 2021).

Já após a ativação física, o carvão ativado passa por uma etapa de resfriamento em ambiente inerte, geralmente com nitrogênio, para evitar a combustão espontânea do material ainda quente ao entrar em contato com o oxigênio atmosférico (SANTOS et al., 2021). Embora o processo físico não utilize agentes químicos, recomenda-se uma lavagem com água destilada para remover resíduos minerais ou partículas soltas e ajustar o pH do material (MORAIS et al., 2021). Em seguida, o carvão é submetido à secagem em estufa a aproximadamente 110 °C, garantindo a eliminação da umidade residual (OLIVEIRA et al., 2022). Por fim, realiza-se a moagem e a classificação granulométrica, com o objetivo de adequar o produto final ao uso pretendido (SANTOS et al., 2021). A Tabela 3 mostra as etapas da produção do carvão ativado a partir da casca do coco verde. Já a Tabela 4, compara as ativações física e química.

Tabela 3 – Etapas da Produção de Carvão Ativado da Casca do Coco Verde  
(continua)

Etapa	Descrição
Pré-tratamento	Lavagem, secagem e trituração da casca.
Carbonização	Aquecimento sem oxigênio a 400–600 °C para formar matriz carbonosa.

Tabela 3 – Etapas da Produção de Carvão Ativado da Casca do Coco Verde  
(conclusão)

Etapa	Descrição
Ativação Física	Aquecimento a 800–1000 °C com vapor ou CO <sub>2</sub> para abertura de poros.
Ativação Química	Impregnação com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , KOH ou ZnCl <sub>2</sub> seguida de aquecimento a 400–700 °C.
Lavagem e Secagem	Lavagem com água destilada para remoção de resíduos químicos e secagem a 110 °C.
Classificação	Moagem e separação granulométrica.

Fonte: MORAIS, R. M. et al. (2021); SANTOS, A. L. et al. (2021); OLIVEIRA, M. T. et al. (2022).

Tabela 4 - Comparação entre a ativação física e química

(continua)

Parâmetro	Ativação Física	Ativação Química
Temperatura de Ativação	800–1000 °C	400–700 °C
Agente Ativante	Vapor d'água (H <sub>2</sub> O), dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Ácido fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ), hidróxido de potássio (KOH), cloreto de zinco (ZnCl <sub>2</sub> )
Tempo de Ativação	2 a 3 horas	1 a 2 horas
Área Superficial Específica	400–800 m <sup>2</sup> /g	>1000 m <sup>2</sup> /g

Tabela 4 - Comparação entre a ativação física e química

(conclusão)

Parâmetro	Ativação Física	Ativação Química
Volume de Poros	Predominância de microporos, menor volume total	Maior desenvolvimento de mesoporos e volume total
Rendimento	Menor, devido à maior perda de massa	Maior, com menor perda de massa
Impacto Ambiental	Menor geração de resíduos líquidos, maior consumo energético	Geração de resíduos líquidos, menor consumo energético
Aplicações Típicas	Adsorção de gases, resistência térmica	Tratamento de águas e efluentes

Fontes: FERREIRA et al. (2020); SILVA et al. (2021); OLIVEIRA et al. (2022); UFRGS (2023).

#### 5.4.2. Hidrólise térmica combinada com carbonização

A hidrólise térmica é um processo de pré-tratamento que consiste na exposição da biomassa lignocelulósica a vapor sob alta pressão e temperatura moderada, geralmente entre 160 °C e 250 °C, por períodos que variam de 15 a 60 minutos. Esse processo ocorre em reatores fechados, onde o vapor penetra na estrutura da casca do coco verde, promovendo a quebra das cadeias de hemicelulose e a desestruturação parcial da celulose. Essa degradação térmica controlada torna o material mais suscetível aos processos subsequentes, principalmente à carbonização (NARITA, 2021; LI et al., 2022).

A hidrólise também altera significativamente a composição elementar da biomassa, enriquecendo a fração carbonácea e aumentando a concentração de grupos funcionais oxigenados, o que favorece as interações superficiais durante a ativação. Como subproduto, a hidrólise térmica pode gerar líquidos ricos em ácidos

orgânicos e açúcares solúveis, os quais podem ser aproveitados em outras rotas bioquímicas, tornando o processo ainda mais sustentável (ZHANG et al., 2023). Além disso, esse pré-tratamento contribui para a remoção de compostos inorgânicos que poderiam atuar como catalisadores indesejados na carbonização (FERREIRA et al., 2020).

Após a hidrólise, o material é submetido à carbonização, que consiste em aquecer a biomassa em ausência de oxigênio, normalmente em fornos tubulares ou muflas, sob atmosfera inerte (como nitrogênio ou argônio), a temperaturas que variam entre 400 °C e 600 °C. Durante essa etapa, ocorre a degradação térmica da matéria orgânica, resultando na liberação de substâncias voláteis (como CO, CO<sub>2</sub>, metano e alcatrões) e na formação de uma estrutura rica em carbono. A carbonização é essencial para a formação da matriz porosa, que será posteriormente ativada, e deve ser controlada quanto à taxa de aquecimento, tempo de residência e fluxo de gás inerte para garantir uniformidade e rendimento adequados (NARITA, 2021; LI et al., 2022).

A combinação entre a hidrólise térmica e a carbonização permite uma produção mais eficiente de carvão ativado, pois o pré-tratamento facilita a remoção dos compostos voláteis e favorece a formação de microporos. Esse processo integrado resulta em carvão com elevada área superficial e capacidade adsortiva, sendo particularmente eficaz na remoção de metais pesados e compostos orgânicos em meio aquoso. Estudos apontam que a área superficial pode ser aumentada em até 30% com o uso da hidrólise térmica, comparado à carbonização direta (ZHANG et al., 2023). Além disso, a utilização de resíduos como a casca do coco verde contribui para a valorização de subprodutos agroindustriais e para práticas sustentáveis de engenharia de materiais (NARITA, 2021; FERREIRA et al., 2020).

#### **5.4.3. Ativação com Micro-ondas**

A ativação com micro-ondas é uma técnica moderna que utiliza radiação eletromagnética de alta frequência para promover o aquecimento interno da biomassa. No caso da casca do coco verde, o material é colocado em um reator de micro-ondas com controle de potência, onde ocorre aquecimento volumétrico, diferente do aquecimento superficial dos métodos convencionais. A frequência usual

é de 2,45 GHz, e o tempo de exposição pode variar de 10 a 30 minutos, dependendo da umidade e da composição química do material (LIMA et al., 2023). Antes da ativação, a casca pode ser impregnada com agentes químicos ativantes, como KOH, ZnCl<sub>2</sub> ou H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, que são aplicados por imersão ou nebulização e seguidos de secagem. Esses agentes penetram nos poros da biomassa e reagem durante o aquecimento por micro-ondas, promovendo a formação de uma rede de poros através de reações químicas e liberação de gases. A remoção de voláteis ocorre de maneira rápida, e a simultaneidade da carbonização e ativação reduz significativamente o tempo total do processo, otimizando a produção (SOARES et al., 2023).

Após a ativação, o material é resfriado, lavado com soluções ácidas diluídas e água destilada para remover os resíduos químicos, e finalmente seco a cerca de 110 °C. O carvão ativado obtido apresenta elevada área superficial, porosidade bem distribuída e grande capacidade adsortiva, sendo aplicável na remoção de corantes, fármacos e compostos tóxicos. Além disso, a ativação com micro-ondas é considerada energeticamente eficiente, com menores emissões e resíduos, sendo uma alternativa promissora para a produção sustentável de adsorventes (LIMA et al., 2023).

#### **5.4.4. Ativação por plasma**

A ativação por plasma consiste na exposição do carvão previamente carbonizado a um fluxo de gás ionizado, conhecido como plasma, dentro de uma câmara de baixa pressão. Esse plasma é gerado pela aplicação de campos elétricos de alta voltagem em gases como oxigênio, nitrogênio ou argônio. As partículas energizadas interagem com a superfície do carvão, promovendo modificações físico-químicas que aumentam a reatividade do material e sua afinidade com poluentes (TEIXEIRA e ALVES, 2020; CHEN et al., 2022).

Durante o processo, o carvão é posicionado em uma bandeja condutora ou suporte dielétrico e exposto ao plasma por tempos controlados que variam de 5 a 60 minutos, dependendo da intensidade do campo elétrico e da natureza do gás utilizado. A interação com o plasma remove impurezas residuais, introduz grupos funcionais ácidos ou básicos (como carbonilas, hidroxilas e carboxilas) na superfície do material e gera microfissuras que ampliam a área superficial. A escolha do tipo de

plasma influencia diretamente as propriedades finais do carvão ativado: plasmas de oxigênio favorecem a oxidação da superfície, enquanto os de nitrogênio aumentam a basicidade do material (CHEN et al., 2022; SONG et al., 2021).

Diferentemente dos métodos convencionais, a ativação por plasma ocorre em temperaturas relativamente baixas (geralmente abaixo de 200 °C), o que preserva a estrutura original do carvão e reduz o consumo energético. Além disso, por não utilizar reagentes líquidos, o processo não gera efluentes tóxicos, sendo considerado uma alternativa verde. A limpeza superficial promovida pelo plasma também aumenta a acessibilidade dos poros, melhorando o desempenho adsortivo em aplicações ambientais, como a remoção de compostos orgânicos voláteis (COVs) e metais pesados de águas contaminadas (LI et al., 2023).

Apesar da exigência de equipamentos específicos e controle rigoroso de pressão e atmosfera, a ativação por plasma tem se destacado pela produção de carvões ativados altamente funcionais. Esses materiais têm sido aplicados com sucesso na adsorção de gases tóxicos, purificação de água e até mesmo na fabricação de sensores eletroquímicos e dispositivos de armazenamento de energia, como supercapacitores. O uso da casca de coco verde nesse processo representa uma solução sustentável para resíduos agrícolas, além de viabilizar a obtenção de materiais avançados com propriedades únicas (TEIXEIRA e ALVES, 2020; SONG et al., 2021; LI et al., 2023).

## 5.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE PRODUÇÃO

Os diferentes métodos de produção de carvão ativado a partir da casca do coco verde apresentam vantagens e limitações específicas, sendo selecionados de acordo com as características desejadas do material final, a disponibilidade de equipamentos, o custo e o impacto ambiental. A pirólise convencional (5.4.1), por exemplo, é amplamente utilizada por sua simplicidade e baixo custo operacional, sendo eficaz para a produção de carvão pré-ativado. No entanto, quando associada apenas à ativação física, requer temperaturas elevadas (800–1000 °C) e maior consumo energético (SANTOS et al., 2020; MORAIS et al., 2021).

Por outro lado, a hidrólise térmica combinada com a carbonização (5.4.2) oferece uma abordagem mais eficiente no pré-tratamento da biomassa, permitindo melhor formação de poros e maior área superficial no produto final. A hidrólise

promove a remoção de compostos inorgânicos e a geração de grupos funcionais reativos, além de viabilizar o aproveitamento de subprodutos líquidos ricos em carbono, o que contribui para a sustentabilidade do processo (NARITA, 2021; ZHANG et al., 2023). Apesar disso, esse método exige equipamentos de alta pressão e controle preciso de temperatura, o que pode elevar os custos iniciais.

A ativação com micro-ondas (5.4.3) destaca-se por sua rapidez e eficiência energética. O aquecimento volumétrico proporciona carbonização e ativação simultâneas em curtos períodos, reduzindo o consumo de energia e o tempo de processamento. Estudos indicam que carvões produzidos por essa técnica apresentam excelente desempenho na adsorção de corantes e poluentes orgânicos (LIMA et al., 2023; SOARES et al., 2023). Entretanto, a uniformidade da ativação depende da homogeneidade da amostra e do controle preciso dos parâmetros operacionais, além de demandar um reator específico.

Por fim, a ativação por plasma (5.4.4) representa uma tecnologia de ponta, com grande potencial para modificação seletiva da superfície do carvão. Esse método utiliza gases ionizados em condições de baixa pressão, resultando em carvões com elevada funcionalização química e excelente desempenho na adsorção de COVs e metais pesados. Embora ambientalmente favorável e eficaz, a ativação por plasma ainda é restrita a laboratórios e centros de pesquisa devido ao alto custo dos equipamentos e à necessidade de atmosferas controladas (TEIXEIRA e ALVES, 2020; CHEN et al., 2022; LI et al., 2023).

Portanto, a escolha do método mais adequado dependerá do equilíbrio entre desempenho adsorptivo, viabilidade econômica e impacto ambiental. A combinação de técnicas, como a hidrólise térmica seguida de ativação por micro-ondas ou plasma, pode representar uma estratégia promissora para otimizar a produção de carvões ativados sustentáveis e de alto desempenho a partir da casca do coco verde. As principais vantagens, limitações e aplicações de cada método são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Vantagens, limitações e aplicações dos métodos de produção de carvão ativado

Método	Vantagens	Limitações	Aplicações
Pirólise convencional	Simple, barato e amplamente utilizado	Temperaturas elevadas (800–1000 °C) e maior consumo energético	Adsorção de metais pesados, corantes e compostos orgânicos; tratamento de efluentes e gases
Hidrólise térmica	Melhor eficiência no pré-tratamento, sustentabilidade, melhor formação de poros e alta área superficial	Exige equipamentos de alta pressão e controle preciso de temperatura	Adsorção de metais pesados, produção de ácidos orgânicos e açúcares solúveis
Micro-ondas	Rapidez e eficiência energética	Reator específico, depende da homogeneidade do material	Adsorção de corantes e poluentes orgânicos
Plasma	Produz carvão com alta funcionalização e baixas temperaturas	Alto custo, restrito a laboratórios	Adsorção de compostos orgânicos voláteis, metais pesados, sensores

Fonte: SANTOS et al. (2020), MORAIS et al. (2021), NARITA (2021), ZHANG et al. (2023), LIMA et al. (2023), SOARES et al. (2023), TEIXEIRA e ALVES (2020), CHEN et al. (2022) e LI et al. (2023).

## 5.6. PARÂMETROS CRÍTICOS DO PROCESSO

Os principais parâmetros que influenciam a produção e qualidade do carvão ativado são: temperatura, tempo de residência e tipo/concentração do agente ativante. A temperatura afeta diretamente a estrutura porosa do material, sendo que valores mais elevados tendem a aumentar a microporosidade, porém com possível redução no rendimento (LIMA et al., 2020). O tempo de residência define o grau de carbonização e ativação do material; períodos mais longos favorecem a formação de poros, mas podem resultar em colapso da estrutura (MENDES et al., 2021). No caso da ativação química, a concentração do agente ativante influencia a eficiência da impregnação e o desenvolvimento da área superficial, sendo necessário otimizar a razão massa/massa entre agente e precursor (SILVA et al., 2018).

Dessa forma, o controle adequado desses parâmetros é essencial para a obtenção de um carvão ativado com propriedades adsorptivas ideais para diversas aplicações na engenharia química, como tratamento de efluentes, adsorção de compostos orgânicos, remoção de metais pesados e uso em processos catalíticos (COSTA; RIBEIRO, 2020).

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **6.1. CAPACIDADE ADSORTIVA**

O carvão ativado derivado da casca do coco verde tem se destacado na engenharia química por seu alto potencial em processos de remoção de poluentes, tratamento de águas e aplicações industriais (SANTOS et al., 2021; LIMA et al., 2020). Sua eficiência está associada à adsorção, um processo físico-químico em que moléculas ou íons aderem à superfície de um sólido, favorecida pela ampla área superficial, porosidade e grupos funcionais do material (OLIVEIRA et al., 2022; SILVA e ALMEIDA, 2021). Essa propriedade é amplamente aplicada na remoção de corantes, metais pesados e compostos orgânicos voláteis, sendo fundamental em diversas etapas de purificação e tratamento (MORAIS et al., 2021; SOUZA et al., 2023). Estudos recentes mostram a eficácia desse material na remoção de compostos como o azul de metileno e o ftalato de dietila (SOARES et al., 2023; SILVA et al., 2021), além de comprovarem seu alto desempenho adsorptivo, com capacidades superiores a 1000 mg/g, dependendo do método de ativação utilizado (SALEEM et al., 2024). A seguir, as Tabelas 6, 7 e 8 apresentam os resultados da

literatura recente sobre a capacidade adsorptiva e usos industriais (MORAIS et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022; SOARES et al., 2023; SALEEM et al., 2024).

Tabela 6 – Adsorção de Corantes pelo Carvão Ativado da Casca do Coco Verde

Corante	Eficiência de remoção (%)	pH	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Azul de metileno	92%	7	25	120
Vermelho reativo 120	88%	6	30	90
Amarelo tartrazina	85%	5	25	60

Fonte: OLIVEIRA et al. (2022).

Tabela 7 – Adsorção de Metais Pesados pelo Carvão Ativado da Casca do Coco Verde

Metal Pesado	Eficiência de remoção (%)	pH	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Chumbo (Pb <sup>2+</sup> )	95%	5	25	60
Cádmio (Cd <sup>2+</sup> )	89%	6	30	90
Zinco (Zn <sup>2+</sup> )	82%	6	25	60

Fonte: SANTOS et al. (2021).

Tabela 8 – Adsorção de Compostos Orgânicos pelo Carvão Ativado da Casca do Coco Verde

Composto Orgânico	Eficiência de remoção (%)	pH	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Fenol	90%	6	30	120
Tolueno	87%	7	25	90
Benzina	80%	7	25	60

Fonte: MORAIS et al. (2021).

A Tabela 6 demonstrou que o carvão ativado derivado da casca do coco verde tem uma excelente remoção em corantes, ultrapassando os 90% para o Azul de metileno. Já em relação aos metais pesados, vistos na Tabela 7, consegue-se destacar a remoção de Chumbo, atingindo 95% em 1 hora. Por fim, na Tabela 8, tem-se as remoções de compostos orgânicos, com destaque para a remoção de Fenol, sendo esta 90% em um período de 2 horas.

O carvão ativado derivado da casca do coco verde pode ser utilizado no tratamento de água e efluentes, devido à sua alta eficiência na remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos, corantes sintéticos, pesticidas, metais pesados e compostos tóxicos (SANTOS et al., 2021). Sua estrutura microporosa permite a retenção de partículas em suspensão e a adsorção de substâncias dissolvidas, tornando o processo eficiente e sustentável. Além disso, o uso de um resíduo agrícola como matéria-prima torna essa alternativa ecologicamente viável e de baixo custo (MORAIS et al., 2021). Embora sua aplicação industrial ainda ocorra em escala mais restrita quando comparada a carvões comerciais convencionais, estudos demonstram que o carvão ativado da casca do coco verde possui forte potencial e já vem sendo empregado em indústrias de tratamento de água, purificação de bebidas, cosméticos e fármacos (FERREIRA et al., 2020; SOARES et al., 2023).

Além da aplicação no tratamento de águas e efluentes, o carvão ativado produzido a partir da casca do coco verde possui aplicações promissoras em processos industriais, como em colunas de adsorção em indústrias químicas,

purificação de gases, controle de emissões atmosféricas, recuperação de solventes e como suporte de catalisadores em processos de síntese orgânica (MORAIS et al., 2021; SANTOS et al., 2021).

Na indústria química, o carvão ativado da casca do coco verde pode ser empregado em colunas de adsorção para separação e purificação de compostos, removendo impurezas de solventes, ácidos e gases industriais (SANTOS et al., 2021). No setor alimentício, pode ser utilizado para a descoloração de soluções, remoção de odores e purificação de ingredientes ativos. Em laboratórios e indústrias farmacêuticas, serve como suporte de catalisadores e meio filtrante para substâncias químicas sensíveis. Também é aplicado na recuperação de metais preciosos em processos metalúrgicos e na purificação de biocombustíveis e fluidos industriais (OLIVEIRA et al., 2022).

## 6.2. PROCESSOS DE ATIVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

A fim de aprofundar o entendimento sobre o carvão ativado produzido a partir da casca de coco verde, diversos estudos foram conduzidos, empregando diferentes métodos de ativação e técnicas de caracterização. A Tabela 9 apresenta, de forma resumida, os principais resultados obtidos nessas pesquisas.

Tabela 9 – Comparação de Estudos sobre Carvão Ativado de Casca de Coco Verde (continua)

Material	Processo Utilizado	Condições do Processo	Caracterização Realizada	Referência
Casca de coco verde	Ativação química com $H_3PO_4$	20–85% $H_3PO_4$ , 12–24h de imersão, 110 °C	BET, FTIR, MEV, adsorção de azul de metileno	(SOARES, 2019)
Casca de coco verde	Ativação química com $ZnCl_2$	50% $ZnCl_2$ , ativação térmica	Adsorção de resíduos de lavanderia	(SILVA et al., 2022)

Tabela 9 – Comparação de Estudos sobre Carvão Ativado de Casca de Coco Verde (continuação)

Material	Processo Utilizado	Condições do Processo	Caracterização Realizada	Referência
Casca de coco verde	Ativação química com NaOH	0,1 mol/L NaOH, agitação, neutralização com HCl	Adsorção de vermelho de metila, UV-Vis	(GAETAN et al., 2023)
Fibra e casca de coco verde	Ativação química com KOH, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Variações de temperatura e concentração dos ativantes	Adsorção de íons Cu <sup>2+</sup> , armazenamento de H <sub>2</sub> , catalisador Fenton	(NARITA, 2021)
Mesocarpo do coco verde	Ativação física com vapor d'água	Otimização por superfície de resposta	Adsorção de Remazol Black B	(ALBUQUERQUE JÚNIOR, 2002)
Casca de coco verde	Ativação química com ZnCl <sub>2</sub>	Impregnação com 50% ZnCl <sub>2</sub> , secagem a 80 °C por 15 h, ativação térmica	Adsorção de resíduos de lavanderia industrial, comparação com carvão comercial	(SILVA et al., 2020)
Casca de coco verde	Ativação térmica (pirólise)	Pirólise a 550 °C	MEV, EDS, PCZ, testes cinéticos de adsorção de azul de metileno	(OLIVEIRA et al., 2022)

Tabela 9 – Comparação de Estudos sobre Carvão Ativado de Casca de Coco Verde (conclusão)

Material	Processo Utilizado	Condições do Processo	Caracterização Realizada	Referência
Casca de coco + vapor	Ativação física a vapor	600 °C (1 h) + vapor a 800 °C por 60 min → n° de iodo 821 mg/g	SEM, rendimento, iodagem	(RAMESH, 2022)
Casca de coco	Ativação química (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) após pirólise a 700 °C	Pirólise 700 °C; ativação com H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (razão específica)	BET, SEM, XRD, FTIR	(ZULFIQAR et al., 2023)
Cascas de coco (shell/husk)	Ativação química e física (ácido/base + impregnação)	Uso de óxidos metálicos, H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> , NaOH; condições variadas	BET, funcionalização, adsorção de corantes	(SOUZA et al., 2024)
Casca de coco verde	Ativação por micro-ondas com CH <sub>3</sub> COONa	Ativação por micro-ondas utilizando acetato de sódio como ativante	MEV, Índice de Azul de Metileno, testes de filtração de água do Rio Capibaribe	(COSTA et al., 2023)
Cascas e conchas de coco	Ativação via autoativação com gases da pirólise	Pirólise lenta + ativação pelo próprio gás a temperaturas elevadas	Porosidade microporosa	(FERREIRA et al., 2021)

Quanto aos processos descritos na Tabela 9, a ativação química teve destaque, sendo majoritariamente realizada com  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e  $\text{ZnCl}_2$ . Esses agentes promovem a desidratação da matéria-prima e a formação de poros, resultando em materiais com elevadas áreas superficiais específicas (BET) e desempenho superior na remoção de corantes e resíduos industriais. Alternativamente, agentes alcalinos como  $\text{NaOH}$ , bem como combinações inovadoras envolvendo  $\text{KOH}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , conforme demonstrado por Narita (2021), têm ampliado as aplicações desses materiais, abrangendo desde a adsorção de íons metálicos como  $\text{Cu}^{2+}$  até o uso como catalisadores em reações de Fenton e no armazenamento de hidrogênio. Além disso, métodos de ativação física, incluindo o uso de vapor d'água e irradiação por micro-ondas, têm sido explorados tanto em estudos pioneiros quanto em pesquisas recentes (Albuquerque Júnior, 2002; Costa et al., 2023), oferecendo alternativas sustentáveis e energeticamente eficientes, com bons resultados na remoção de corantes como Remazol Black B e Azul de Metileno, bem como na purificação de águas naturais.

Em relação às condições de processo (Tabela 9), que exercem papel crucial na eficiência dos materiais adsorventes obtidos, a concentração dos agentes ativantes e o tempo de impregnação são parâmetros frequentemente ajustados para otimizar a porosidade e a capacidade de adsorção. Estudos relatam o uso de concentrações variando entre 20% e 85% para o  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e até 50% para o  $\text{ZnCl}_2$ , com tempos de imersão entre 12 e 24 horas, indicando a necessidade de um balanceamento preciso entre ativação química e integridade estrutural do material. Outro fator determinante é a temperatura de ativação, que pode variar desde processos de secagem a  $80\text{ }^\circ\text{C}$  até etapas de pirólise a  $550\text{ }^\circ\text{C}$ . Essas variações térmicas impactam diretamente na formação da estrutura porosa e na estabilidade térmica do produto final. Protocolos mais intensos, com temperaturas elevadas, tendem a favorecer a geração de carvão ativado com alta proporção de microporos, o que o torna particularmente eficaz na adsorção de moléculas pequenas, como o azul de metileno.

As técnicas de caracterização do carvão ativo mais empregadas (Tabela 9), incluem: a análise BET, que fornece dados sobre a área superficial específica; a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizada para identificar grupos funcionais na superfície; e a microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de dispersão de energia (MEV/EDS), que revela a

morfologia e a composição elementar. Estudos mais recentes, como o de Oliveira et al. (2022), têm incorporado métodos adicionais, como a perfilometria de canais de zeta (PCZ) e testes cinéticos, aprofundando a compreensão dos mecanismos envolvidos na adsorção.

Por fim, a Tabela 9 demonstra que aplicações dos carvões ativados produzidos a partir da casca de coco verde têm demonstrado notável eficiência na adsorção de contaminantes, especialmente em contextos de tratamento de efluentes têxteis e industriais. Diversos estudos (Soares, 2019; Silva et al., 2020, 2022) confirmam que esses materiais apresentam desempenho comparável ou superior ao de carvões comerciais, destacando-se como alternativas economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. Além disso, a ativação por micro-ondas, abordada por Costa et al. (2023), surge como uma estratégia promissora, combinando eficiência energética, rapidez de processamento e viabilidade para aplicações em escala industrial, reforçando o potencial desses materiais em soluções sustentáveis de tratamento ambiental.

### 6.3. COMPARAÇÃO COM O CARVÃO ATIVADO COMERCIAL

O carvão ativado comercial é amplamente utilizado em diversos setores industriais devido à sua alta eficiência, padronização e pureza. Ele é normalmente produzido a partir de fontes como carvão mineral, madeira ou casca de coco seco, utilizando tecnologias avançadas de ativação física ou química que garantem área superficial superior a 1500 m<sup>2</sup>/g, distribuição de poros controlada e baixa quantidade de cinzas (DIAS et al., 2021). Essas características o tornam adequado para aplicações rigorosas, como purificação de ar, tratamento de água potável e em processos farmacêuticos, onde a consistência do produto é fundamental.

Em contrapartida, o carvão ativado obtido a partir da casca do coco verde apresenta características variáveis, dependendo do método de ativação e do controle das condições de processo, como temperatura, agente ativante e tempo de residência (SANTOS et al., 2021). Apesar disso, estudos mostram que esse material pode atingir áreas superficiais entre 800 e 1200 m<sup>2</sup>/g, com desempenho comparável ao comercial em testes de adsorção de corantes, metais pesados e compostos orgânicos (OLIVEIRA et al., 2022). No entanto, apresenta desvantagens como maior

heterogeneidade de partículas, possível maior teor de cinzas e limitações na escala de produção (MORAIS et al., 2021).

Por outro lado, o carvão ativado da casca do coco verde se destaca como uma alternativa mais sustentável e de menor custo, especialmente em países tropicais com alta disponibilidade dessa biomassa residual. Além disso, seu uso contribui para a valorização de resíduos agroindustriais, alinhando-se aos princípios da economia circular. Assim, embora o carvão comercial apresente desempenho superior em termos de uniformidade e padronização, o carvão de coco verde representa uma solução promissora para aplicações onde o custo, a disponibilidade local e a sustentabilidade são fatores determinantes (DIAS et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2022).

Para avaliar o desempenho do carvão ativado obtido da casca do coco verde frente ao carvão ativado comercial, foram considerados parâmetros como área superficial, capacidade de adsorção, eficiência, tempo de equilíbrio, entre outros aspectos relevantes. A Tabela 10 apresenta uma comparação baseada em dados de estudos recentes disponíveis na literatura.

Tabela 10 - Comparação entre o carvão ativado comercial e o da casca do coco verde

(continua)

Parâmetro	Carvão Ativado Comercial	Carvão Ativado da Casca do Coco Verde
Área Superficial (m <sup>2</sup> /g)	632	554,2
Capacidade de Adsorção – Azul de metileno (mg/g)	104,2	30,3
Eficiência de Remoção – Azul de metileno (%)	98,64	99,42
Tempo de Equilíbrio (min)	120	360
Granulometria	Uniforme	Variável
Teor de Cinzas (%)	Baixo	Pode ser mais elevado

Tabela 10 - Comparação entre o carvão ativado comercial e o da casca do coco verde

(conclusão)

Parâmetro	Carvão Ativado Comercial	Carvão Ativado da Casca do Coco Verde
Custo de Produção	Mais elevado	Mais baixo
Sustentabilidade Ambiental	Menor	Maior (uso de resíduo agroindustrial)

Fonte: Adaptado de: ATTA, O. A. M. et al. (2024); KHULUK et al. (2019); LE, Van-Chinh et al. (2022); LIMA et al. (2015); NARITA (2021); SILVA et al. (2021) e SOUZA et al. (2008).

A produção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais, como a casca do coco verde, representa uma alternativa sustentável que reduz os impactos ambientais associados ao descarte desses materiais. O aproveitamento de biomassas residuais minimiza o uso de matérias-primas não renováveis e colabora com a gestão de resíduos sólidos urbanos, promovendo uma abordagem compatível com os princípios da economia circular (RAMOS et al., 2020). Além disso, o uso desses resíduos evita práticas prejudiciais como o desmatamento para obtenção de madeira, frequentemente utilizada na produção convencional de carvão vegetal (RODRIGUES, 2020).

Do ponto de vista energético e ambiental, processos de ativação que utilizam biomassa, como os baseados em casca de coco verde, apresentam menor consumo térmico e potencial de emissão de carbono reduzido quando comparados a materiais fósseis ou madeira de origem nativa (SANTOS; SILVA; PEREIRA, 2021). Essa estratégia não apenas contribui para a mitigação de impactos ambientais, como também se alinha aos princípios da engenharia verde ao propor soluções técnicas mais limpas e sustentáveis (SANTOS; SILVA; PEREIRA, 2021).

#### 6.4. LIMITAÇÕES E DESAFIOS PARA APLICAÇÃO EM LARGA ESCALA

A utilização da casca de coco como matéria-prima para a produção de carvão ativado tem se mostrado uma alternativa promissora, sobretudo em regiões tropicais com elevada produção do fruto, como o Brasil. No entanto, a implantação dessa tecnologia em larga escala esbarra em múltiplos desafios que envolvem fatores logísticos, operacionais, econômicos e regulatórios.

Em primeiro lugar, a disponibilidade e logística da matéria-prima colocam-se como entraves significativos. Apesar do vasto volume de cascas geradas pelo consumo de coco, a coleta e o transporte dessas cascas são dificultados pela dispersão geográfica da produção e pela falta de infraestrutura adequada para armazenagem. A casca de coco, especialmente a verde, é frequentemente descartada de modo inadequado, contribuindo para a sobrecarga de aterros sanitários. Além disso, a inexistência de uma cadeia estruturada de coleta e transporte requer investimentos consideráveis em logística para que se garanta um abastecimento contínuo e em boas condições de higiene do material (LEITE et al., 2019; SANTOS et al., 2023).

Outro ponto crítico refere-se aos processos de ativação da biomassa. A obtenção de carvão ativado por meio de ativação química, utilizando reagentes como hidróxido de potássio (KOH), ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) ou cloreto de zinco ( $ZnCl_2$ ), provoca a geração de resíduos tóxicos que demandam tratamento adequado, elevando custos e aumentando a complexidade ambiental do processo (SILVA, 2021; CERQUEIRA et al., 2023). Por sua vez, a ativação física apresenta-se como alternativa ambientalmente mais limpa, mas exige temperaturas superiores a 700 °C, resultando em elevado consumo energético e, conseqüentemente, em maiores custos operacionais (SILVA, 2021; SILVA et al., 2022). Dessa forma, a escolha do método de ativação implica diretamente na questão ambiental e no custo final do produto, tornando a viabilidade econômica mais sensível às flutuações nos preços de energia e reagentes químicos.

A heterogeneidade intrínseca da casca de coco também impõe restrições à padronização do carvão ativado. Fatores como o grau de maturação do fruto e as condições de cultivo influenciam a estrutura anatômica e a composição química da casca, refletindo-se em variações na porosidade, na área superficial específica e na capacidade adsortiva do carvão obtido (SILVA, 2021; SOARES, 2023). Essa variabilidade dificulta o estabelecimento de parâmetros uniformes de qualidade,

essenciais para aplicações industriais em setores que exigem desempenhos consistentes, como tratamento de água, processos químicos e purificação de gases.

Em termos de viabilidade econômica, ainda que estudos em escala laboratorial demonstrem a eficácia do carvão ativado de casca de coco na remoção de diferentes contaminantes (corantes e fármacos), a transição para produção em larga escala enfrenta barreiras financeiras. Os custos associados não apenas ao processamento e ativação, mas também à coleta, transporte e tratamento dos resíduos decorrentes do processo podem tornar o produto final menos competitivo em relação a carvões ativados derivados de outras fontes, como madeira ou bagaço de cana-de-açúcar (Barbosa & Souza, 2023; SANTOS et al., 2023). Ademais, a construção e manutenção de unidades industriais específicas para casca de coco demandam altos investimentos iniciais, o que pode desencorajar empreendedores em ambientes com incertezas quanto à demanda de mercado.

Por fim, as questões regulatórias constituem outro fator limitante. Atualmente, não existem normativas específicas que tratem do carvão ativado produzido a partir de resíduos vegetais como a casca de coco, o que dificulta sua aceitação em indústrias reguladas, especialmente nos segmentos de tratamento de água potável e de insumos para a indústria alimentícia. A conformidade com padrões de qualidade e segurança rigorosos exige investimentos adicionais em pesquisa e desenvolvimento para validar a eficácia e a inocuidade do material em diferentes aplicações (Barbosa & Souza, 2023; SOBRAL, 2024). A falta de diretrizes claras pode resultar em longa tramitação burocrática para obtenção de registros junto a órgãos de controle, retardando a inserção comercial desse biocarvão.

## **7 CONCLUSÃO**

Com base nos estudos analisados, pôde-se concluir que o carvão ativado derivado da casca do coco verde revela-se uma alternativa promissora frente aos carvões ativados comerciais, sobretudo ao considerar critérios de sustentabilidade e aproveitamento de resíduos agroindustriais. As referências demonstraram que, embora o material vegetal apresente área superficial e capacidade adsorptiva ligeiramente inferiores em comparação ao carvão comercial (800–1200 m<sup>2</sup>/g vs. > 1500 m<sup>2</sup>/g, e 30,3 mg/g para azul de metileno no coco verde vs. 104,2 mg/g no carvão comercial), sua eficiência na remoção de diversos contaminantes, como

corantes (até 92 % para azul de metileno), metais pesados (95 % de remoção de  $Pb^{2+}$ ) e compostos orgânicos (90 % de remoção de fenol), comprovam seu potencial prático em tratamentos de água e efluentes. Além disso, a ampla porosidade e o baixo custo de matéria-prima contribuem para sua viabilidade em aplicações onde o fator econômico e ambiental seja determinante.

Adicionalmente, o uso de casca de coco verde alinha-se aos princípios da economia circular, reduzindo o descarte inadequado de biomassa agrícola e mitigando os impactos ambientais decorrentes da decomposição lenta desse resíduo. Em termos energéticos, processos de ativação que utilizam métodos químicos ou físicos mostraram-se capazes de gerar carvão com boas características de adsorção, embora cada rota apresente *trade-offs* específicos: a ativação química pode gerar resíduos tóxicos, enquanto a ativação física exige maiores temperaturas ( $\geq 700$  °C) e, conseqüentemente, maior consumo energético. Mesmo assim, a questão de carbono resultante do emprego de resíduos vegetais costuma ser menor em comparação a fontes fósseis ou madeiras nativas, reforçando o caráter sustentável do material.

Entretanto, para que o carvão de casca de coco verde seja incorporado em larga escala, é fundamental enfrentar limitações logísticas, econômicas e regulatórias. A dispersão geográfica das cascas e a carência de infraestrutura para coleta e transporte dificultam o fornecimento contínuo e padronizado da matéria-prima. Além disso, a variabilidade intrínseca das cascas (decorrente do grau de maturação e condições de cultivo), pode resultar em heterogeneidade na granulometria, teor de cinzas e capacidade adsorptiva, o que exige controle rigoroso do processo de produção para atender exigências industriais. Do ponto de vista econômico, os custos associados ao processamento, ativação, e ao tratamento de efluentes gerados na produção química podem elevar o preço final, tornando o produto menos competitivo frente a carvões derivados de fontes mais consolidadas.

Por fim, ressalta-se a necessidade de avanços em normativas específicas que regulem a produção, caracterização e aplicação de carvão ativado proveniente de resíduos vegetais, de modo a agilizar sua inserção comercial em setores regulados, como o tratamento de água potável e a indústria alimentícia. Recomenda-se, também, o desenvolvimento de estudos de otimização tecnológica, buscando métodos de ativação mais limpos, investigações de reaproveitamento de subprodutos e análises de custo-benefício em escala industrial. Com tais esforços,

espera-se consolidar o carvão de casca de coco verde como uma alternativa viável, sustentável e economicamente atrativa no contexto da engenharia ambiental e química.

## REFERÊNCIAS

AHMAD, A. A.; IDRIS, A. **Preparation and characterization of activated carbons derived from bio-solid: A review.** *Desalination and Water Treatment*, v. 52, n. 25-27, p. 4848–4862, 2014.

ALBUQUERQUE JÚNIOR, E. C. de (2002). **Carvão ativado do mesocarpo do coco verde - produção, otimização e aplicação na adsorção do corante Remazol Black B.** Universidade Federal de Pernambuco.

ALMEIDA, C. A. P. et al. **Caracterização de carvões ativados obtidos de biomassa residual para remoção de contaminantes orgânicos.** *Revista Virtual de Química*, v. 13, n. 2, p. 317–332, 2021.

ALMEIDA, J. F. et al. **Uso de resíduos lignocelulósicos na produção de carvão ativado: uma revisão sistemática.** *Revista Matéria*, v. 26, n. 3, p. 1–12, 2021. DOI: 10.1590/s1517-707620210003.1315

APAOLAZA, L. H.; GASCÓ, A. M.; GUERRERO, F. **Reuse of waste materials as growing media for ornamental plants.** *Bioresource Technology*. v. 96, p. 125-131, 2005.

ARAGÃO, W. M. **Coco: Pós-colheita.** Série Frutas do Brasil. EMBRAPA: Brasília, 2002.

ATTA, O. A. M. et al. **Sustainable Activated Carbon Derived from Coconut Shells for Adsorption of Methylene Blue: Equilibrium, Kinetics, and Thermodynamic Studies.** *Molecules*, v. 29, n. 3, p. 839, 2024. DOI: 10.3390/molecules29030839

AZEVEDO, J. C. V.; VALVERDE, S. A.; MESQUITA, P. L. **Avaliação preliminar da remoção de boro em efluente sintético por adsorção em carvão de ossos bovinos.** *Brazilian Journal of Development*, v.6, n. 3, p. 14394 – 14401, mar. 2020. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/7961/6900>. Acesso em: 12 maio 2025.

BARBOSA, M. L.; SOUZA, R. A. **O potencial do resíduo do Cocos nucifera para a produção de carvão ativado: um mapeamento sistemático.** *Revista Fitos*, v. 17, n. 2, 2023. Disponível em: <https://revistaft.com.br>. Acesso em: 12 maio 2025.

BBC BRASIL. **Conheça cinco focos de reprodução do mosquito Aedes aegypti frequentemente ignorados.** Disponível em: [https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/12/151211\\_focos\\_dengue\\_mw\\_rb](https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/12/151211_focos_dengue_mw_rb). Acesso em: 10 maio 2025.

BBC BRASIL. **Indústria de coco cresce, mas alto desperdício gera desafio tecnológico.** Disponível em: [https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/02/140207\\_coco\\_reciclagem\\_abre\\_pai](https://www.bbc.com/portuguese/noticias/2014/02/140207_coco_reciclagem_abre_pai). Acesso em: 10 maio 2025.

BRAGA, R. da S. **Desenvolvimento de filme polimérico à base de hemicelulose extraída do bagaço de cana-de-açúcar**. 2018. 47 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Produção agrícola municipal: coco-da-baía**. Cidades@, 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/15/11902>. Acesso em: 20 maio 2025.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S.; MAKISHIMA, N. **Fibra da casca de coco verde como substrato agrícola**. Hortic. Bras. V. 20, n.4, 533-535. 2002.

CERQUEIRA, S. L. dos S. et al. **Aproveitamento da casca de coco na produção de carvão ativado para aplicação em efluentes sintéticos contendo paracetamol**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, 2023. Disponível em: <https://repositorio.fei.edu.br/handle/FEI/5102>. Acesso em: 3 jun. 2025.

CHEN, X. et al. **Plasma activation of biochar for enhanced adsorption of heavy metals: Mechanisms and applications**. Chemical Engineering Journal, v. 435, p. 135–155, 2022.

CHEN, Y. et al. **Biomass-based pyrolytic polygeneration system on cotton stalk pyrolysis: influence of temperature**. Bioresource Technology, v. 107, p. 411–418, 2012.

CORRADINI, E.; ROSA, M. F.; MACEDO, B. P. et al. **Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde**. Rev. Bras. Frutic., v. 31, n. 3, p.837-846, 2009

CORREIA, D.; ROSA, M. F.; NORÕES, E. R. V.; ARAÚJO, F. B. **Uso do pó da casca de coco na formulação de substratos para formação de mudas enxertadas de cajueiro anão precoce**. Rev. Bras. Frutic. v. 25, n. 3, p. 557-558, 2003.

COSTA, F. F. et al. (2023). **Carvão ativado por micro-ondas a partir do coco verde: uma alternativa sustentável para tratamento de água**. FEBRACE 2023. Disponível em: <https://virtual.febrace.org.br/2023/BIO/1807/>. Acesso em: 3 jun. 2025.

COSTA, R. F.; RIBEIRO, C. A. **Produção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais para aplicação em tratamento de águas**. Revista Ambiente & Água, v. 15, n. 6, p. 1–15, 2020. DOI: 10.4136/ambi-agua.2560

CUNHA, L. **Pepsico tenta aumentar o consumo de água de coco**. Jornal Valor Econômico, São Paulo, p.8, 11 jan. Caderno: Empresas. 2011.

DIAS, M. O. S. et al. **Activated carbon from biomass: sustainable applications and recent trends**. Chemical Engineering Journal, v. 406, p. 126–135, 2021.

FERREIRA, J. A. et al. **Uso de carvão ativado de resíduos agroindustriais para adsorção de contaminantes em águas residuais**. Revista Ambiente & Água, v. 15, n. 6, p. 1–12, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2564>.

FERREIRA, L. M. **Sustentabilidade e valorização de resíduos orgânicos: caminhos para a inovação na engenharia química.** Revista Brasileira de Engenharia Sustentável, v. 4, n. 2, p. 45–53, 2018.

FERREIRA, M. E. et al. **Hidrólise térmica de resíduos lignocelulósicos como pré-tratamento para obtenção de carvão ativado.** Revista Engenharia e Ciência, v. 16, n. 2, p. 44–52, 2020.

FERREIRA, R. S. et al. **Autoactivation process of coconut waste for producing porous carbon.** \*Bioresource Technology\*, v. 320, 2021.

FERREIRA, S. L. C. et al. **Produção de carvão ativado: uma revisão.** Revista Virtual de Química, v. 12, n. 4, p. 802-829, 2020.

FERREIRA, T. L.; ROCHA, M. A.; NASCIMENTO, V. C. **Adsorção de metais pesados com carvão ativado de casca de coco verde: estudo comparativo com carvões comerciais.** Journal of Hazardous Materials Advances, v. 7, p. 100165, 2022.

FLORENTINO, W. M.; BRANDÃO, A.; MILEO, P. C. et al. **Biocompósitos de Poliuretano reforçados com Fibras de Coco Verde.** Cadernos Unifoa. 17:11-16. 2011.

FRASSOLDATI, A. et al. **Detailed kinetic modeling of thermal degradation of biomasses.** In: 29th Meeting on Combustion, Napoli, Itália, 2006.

FU, Y. et al. **Activated bio-chars derived from rice husk via one- and two-step KOH-catalyzed pyrolysis for phenol adsorption.** Science of The Total Environment, v. 646, p. 1567–1577, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.423>.

GAETAN, R. C. et al. (2023). **Produção de carvão ativado de casca de coco para remoção do azocorante vermelho de metila.** Revista de Iniciação Científica, 1(1), 1-15.

HAMZA, U. D. et al. **Characteristics of oil palm shell biochar and activated carbon prepared at different carbonization times.** Desalination and Water Treatment, v. 57, n. 17, p. 7999-8006, 2016.

KHULUK, M. R. et al. **Removal of Methylene Blue by Adsorption onto Activated Carbon From Coconut Shell (*Cocos Nucifera L.*).** Indonesian Journal of Science and Technology, Bandung, v. 4, n. 2, p. 229–240, 2019. DOI: 10.17509/ijost.v4i2.18480.

KLEMM, D. et al. **Nanocelluloses: a new family of nature-based materials.** Angewandte Chemie International Edition, Weinheim, v. 57, n. 11, p. 2978–2993, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.201703000>.

LE, Van-Chinh et al. **Removal of Methylene Blue from Aqueous Solutions Using Commercial Activated Carbon and Modified Rice Husk Biochar.** *Water*, v. 14, n. 21, p. 3576, 2022. DOI: 10.3390/w14213576

LEITE, A. C. S.; MOREIRA, A. M.; LIMA, L. S. **Aproveitamento de resíduos de coco verde em áreas urbanas: potencial e desafios**. *Ciência Florestal*, v. 29, n. 1, p. 337–348, 2019.

LEITE, M. R.; COSTA, J. S.; ANDRADE, P. T. **Impactos ambientais do descarte inadequado da casca do coco verde em áreas urbanas brasileiras**. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 14, n. 2, p. 35–42, 2019.

LI, J. et al. **Recent advances in plasma-treated carbon materials for environmental remediation**. *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 4, p. 2220–2235, 2023.

LIMA, A. A. et al. **Estudos da cinética de adsorção do corante vermelho congo utilizando como adsorventes carvão ativado produzido a partir do pó de bagaço da casca de coco e carvão ativado comercial**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 55., 2015, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza: Associação Brasileira de Química, 2015.

LIMA, M. D. et al. **Efeito da temperatura na produção de carvão ativado de biomassa para remoção de contaminantes**. *Química Nova*, v. 43, n. 8, p. 939–944, 2020. DOI: 10.21577/0100-4042.20170512

LIMA, M. E. P. et al. **Carvão ativado por micro-ondas a partir do coco verde: a viabilidade desse resíduo como tecnologia no tratamento de efluentes**. In: **Feira Brasileira de Ciências e Engenharia – FEBRACE**, 2023. Disponível em: <https://virtual.febrace.org.br/2023/BIO/1807/>. Acesso em: 26 maio 2025.

LÜTKE, S. F. et al. **Preparation of activated carbon from black wattle bark waste and its application for phenol adsorption**. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 7, n. 5, p. 103396, 2019.

MALI, S. et al. **Physicochemical characterization of coconut fibers and their potential in polymer composites**. *Industrial Crops and Products*, Amsterdam, v. 122, p. 674–684, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.056>.

MARTINS, A. P. WATANABE, T. SILVA, P. L. R. et al. **Aproveitamento de fibra de coco verde para aplicabilidade têxtil**. *Revista Redige*. 4(2):1-16, 2013.

MARTINS, C. R.; JESUS Jr. L. A. **Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional**. Documentos 164. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju. 2011.

MATHAI. P. M. **Bast and other plant fibers**. The Textile Institute. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005. p. 275-313.

MENDES, A. C. et al. **Influência do tempo de pirólise na produção de carvão ativado a partir de resíduos agrícolas**. *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 29, n. 2, p. 136–144, 2021. DOI: 10.13083/reveng.v29i2.1042

MORAIS, R. M. et al. **Produção de carvões ativados preparados a partir de diferentes biomassas**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2021.

MORAIS, E. D. **Produção de carvão ativado a partir do mesocarpo do coco-da-baía (cocosnuciferalinn) utilizando H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COONa e KOH como ativantes**. 2014. Dissertação de Mestrado –Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. Disponível em: [https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/22732/1/EveraldoDantasDeMora%20is\\_DISSERT.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/22732/1/EveraldoDantasDeMora%20is_DISSERT.pdf). Acesso em: 4 jun. 2025.

NARITA, C. Y. **Carvões ativados a partir de resíduo de coco verde por diferentes métodos de ativação**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-07042021-161403/publico/CesarYujiNaritaCorr21.pdf>. Acesso em: 26 maio 2025.

NARITA, C. Y. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco verde**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 2021.

OLIVEIRA, A. C. et al. **Potencial da casca de coco verde na produção de carvão ativado: uma abordagem sustentável**. Cadernos de Engenharia e Meio Ambiente, v. 15, n. 1, p. 88–95, 2020.

OLIVEIRA, A. C.; SOUZA, K. M.; RIBEIRO, F. A. **Caracterização e eficiência do carvão ativado produzido a partir de casca de coco verde**. Revista Matéria, v. 27, n. 2, e12497, 2022.

OLIVEIRA, C. P. M. de et al. **Extração da lignina presente no licor negro para adsorção de íons de metais pesados**. Revista Percurso Acadêmico, Belo Horizonte, v. 7, n. 14, jul./dez. 2017.

OLIVEIRA, M. F. et al. (2022). **Carvão ativado obtido da casca de coco verde para remoção de corante AM em meio aquoso: caracterização e cinética de adsorção**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 26(3), 185-191. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/212986>. Acesso em: 3 jun. 2025.

OLIVEIRA, M. T. et al. **Produção de carvão ativado a partir de resíduos agroindustriais: influência dos métodos de ativação**. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. 38, n. 3, p. 350–366, 2022.

OLIVEIRA, M. T. et al. **Produção e caracterização de carvão ativado a partir da casca do coco verde para aplicação em sistemas de adsorção**. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 10, n. 1, p. 104-112, 2022.

OLIVEIRA, M. T. et al. **Produção e caracterização de carvão ativado da casca do coco verde para adsorção de corantes**. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 10, n. 1, p. 104-112, 2022.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 3 jun. 2025.

PEREIRA, T. R.; SOUZA, J. V. **Aplicações do carvão ativado e fontes alternativas de produção**. Revista de Inovação Tecnológica, v. 7, n. 1, p. 22–30, 2019.

RAGAUSKAS, A. J. *et al.* **Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery.** *Science*, Washington, DC, v. 344, n. 6185, p. 1246843, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1246843>.

RAJESH, S. *et al.* **Coir pith as a potential adsorbent for water treatment: a review.** *Journal of Environmental Management*, Amsterdam, v. 201, p. 217–229, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.054>.

RAMESH, N. *et al.* **Preparation and characterization of activated carbon from coconut shell using steam activation.** *\*Journal of Environmental Management\**, v. 305, 2022.

RAMOS, P. H.; GUERREIRO, M. C.; RESENDE, E. C.; GONÇALVES, M. **Produção e caracterização de carvão ativado produzido a partir do defeito preto, verde, ardido (PVA) do café.** *Química Nova*, v. 43, n. 6, p. 723-727, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/w6BHgqfdpdZqMGr7HwmJ4wf/>. Acesso em: 22 maio 2025.

REDDY, N.; YANG, Y. **Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications.** *Trends in Biotechnology*. 23(1):22-27. 2005.

RODRIGUES, L. A. *et al.* **Phenol removal from aqueous solution by activated carbon produced from avocado kernel seeds.** *Chemical Engineering Journal*, v. 174, p. 49-57, 2011.

RODRIGUES, M. F. **Produção de carvão ativado a partir de resíduos agrícolas: uma análise experimental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

RODRIGUES, T. I. **Diagnóstico ambiental da produção de carvão vegetal no município de Tabai – RS.** Universidade do Vale do Taquari – Univates, 2020. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/1406/1/2016ThaisIsabelRodrigues.pdf>. Acesso em: 22 maio 2025.

ROSA, M. F.; BEZERRA, F. C.; CORREIA, D. *et al.* **Utilização da casca de coco como substrato agrícola.** EMBRAPA, Série Documentos 52. Fortaleza, 2002.

ROSA, M. F.; SANTOS, S. J. S.; MONTENEGRO, A. T. *et al.* **Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola.** EMBRAPA, Comunicado Técnico 54. Fortaleza, 2001.

SALEEM, Junaid *et al.* **High-performance activated carbon from coconut shells for dye removal: study of isotherm and thermodynamics.** *RSC Advances*, v. 14, n. 13, p. 5627–5639, 2024. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/ra/d4ra06287f>. Acesso em: 26 maio 2025.

SAMAJA J. **A reprodução social e a saúde.** Casa da Qualidade Editora. Salvador, 2000. 103p

SANTOS, A. C. dos; SILVA, J. F. da; PEREIRA, L. A. **Desenvolvimento de carvão ativado a partir de resíduos plásticos: uma abordagem sustentável.** Universidade de Évora, 2021. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/24052>. Acesso em: 22 maio 2025.

SANTOS, A. L. et al. **Caracterização físico-química da casca do coco verde visando sua aplicação na produção de biocarvão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 25, n. 3, p. 185-191, 2021.

SANTOS, G. A. et al. **Adsorção de corante químico em carvão ativado.** Instituto Federal do Tocantins, 2023. Disponível em: <https://portal.ifto.edu.br/palmas/campus-palmas/ensino/biblioteca/Acervo/trabalhos-academicos/engenharia-civil/2023/gabriel-sagais-silva.pdf>. Acesso em: 12 maio 2025.

SANTOS, L. M. et al. **Pirólise de resíduos vegetais: avaliação dos produtos e aplicação dos carvões.** Revista Virtual de Química, v. 12, n. 4, p. 939–953, 2020. DOI: 10.21577/1984-6835.20200060

SANTOS, P. V. de O. et al. **Produção de carvão ativado de casca de coco para remoção do azocorante vermelho de metila.** Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Química) – ETEC Professor Armando José Farinazzo, Fernandópolis, 2023. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/17896>. Acesso em: 3 jun. 2025.

SANTOS, S. F. O. M.; HATAKEYAMA, K. **Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural.** Produção, v. 22, n. 2, p. 309-321, mar./ abr. 2012. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010365132012000200011&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010365132012000200011&lng=pt&nrm=iso). Acesso em: 3 jun. 2025.

SATIRO, J. R.; BARROS, P. H. S.; BRANDAO, M. C. et al. **Estudo potencial da casca de coco verde para obtenção de etanol lignocelulósico.** Anais do Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas, 2012.

SENHORAS, E. M. **Oportunidades da Cadeia Agroindustrial do Coco Verde: do coco verde nada se perde, tudo se desfruta.** Revista Urutágua, Maringá, n.5, p.08-11, 2004.

SILVA, A. M. et al. **Produção de carvão ativado a partir da casca do coco verde para uso em sistemas de tratamento de água.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA – CBQ, 59., 2019, Águas de Lindóia. Anais eletrônicos. Águas de Lindóia: Associação Brasileira de Química, 2019. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2019/trabalhos/1/1076-27702.html>. Acesso em: 13 maio 2025.

SILVA, C. H. et al. **Ativação química de carvão vegetal com diferentes concentrações de KOH.** Cadernos de Pesquisa Interdisciplinar em Ciências Humanas, v. 19, n. 1, p. 33–44, 2018. DOI: 10.25148/cpicnh.v19i1.878

SILVA, G. R. **Desenvolvimento de carvão ativado a partir da casca de coco verde: caracterização e aplicação em processos de adsorção.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, 2021. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-07042021-161403>. Acesso em: 3 jun. 2025.

SILVA, J. C. **Avaliação dos métodos de ativação de biomassas na produção de carvão ativado: um enfoque ambiental**. Revista Engenharia Sustentável, v. 9, n. 1, p. 74–85, 2021.

SILVA, J. M. et al. **Caracterização e produção de carvões ativados utilizando diferentes agentes ativantes**. Revista Matéria, v. 26, n. 4, 2021.

SILVA, J. P. et al. **Adsorção do dietil ftalato (DEP) em carvão ativado de casca de coco verde: caracterização físico-química e influência dos parâmetros operacionais**. Research, Society and Development, v. 10, n. 14, e289101421966, 2021.

SILVA, R. P. **Desenvolvimento sustentável e o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos**. Revista Científica de Engenharia Ambiental, v. 12, n. 3, p. 112–120, 2021.

SILVA, T. H. G.; STROHER, G. R.; STROHER, G. L. **Avaliação do uso de casca de coco verde para a produção de carvão vegetal**. 2019. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2019, Uberlândia: UFU. Disponível em: <http://www.cobeqic2019.com.br/trabalhos.html>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SILVA, T. H. G. da; STRÖHER, G. R.; STRÖHER, G. L. **Casca de coco verde na produção de carvão vegetal ativado**. International Journal of Development Research, v. 12, p. 24923, 2022. Disponível em: <https://www.journalijdr.com/sites/default/files/issue-pdf/24923.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2025.

SILVA, T. H. G. et al. (2022). **Casca de coco verde na produção de carvão vegetal ativado**. International Journal of Development Research, 12(9), 24923. Disponível em: <https://journalijdr.com/casca-de-coco-verde-na-produ%C3%A7%C3%A3o-de-carv%C3%A3o-vegetal-ativado>. Acesso em: 3 jun. 2025.

SILVA, Túlio Henrique Gonçalves da et al. **Adsorção do dietil ftalato (DEP) em carvão ativado (CA) de casca de coco verde: caracterização físico-química e influência dos parâmetros operacionais**. Research, Society and Development, v. 10, n. 14, e289101421966, 2021. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/355930776>. Acesso em: 26 maio 2025.

SOARES, D. M. V. G. **Carvão ativado obtido da casca de coco verde para remoção de corante AM em meio aquoso: caracterização e cinética de adsorção**. Publicações, v. 1, p. 1–10, 2023. Disponível em: <https://editorapublicar.com.br/ojs/index.php/publicacoes/article/view/637>. Acesso em: 26 maio 2025.

SOARES, T. M. et al. **Potencial de uso de carvão ativado de origem vegetal na indústria cosmética e farmacêutica**. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. 40, n. 1, p. 52–60, 2023.

SOBRAL, I. S. **Produção e aplicação de carvão ativado e carvão ativado funcionalizado do Cocos nucifera associado a Pseudomonas aeruginosa em diferentes tratamentos de águas residuais**. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/40236>. Acesso em: 3 jun. 2025.

SONG, Y. et al. **Nitrogen plasma modified activated carbon for efficient adsorption of volatile organic compounds**. *Journal of Hazardous Materials*, v. 416, p. 125–133, 2021.

SOUZA, F. R. et al. **Estudo da ativação física de carvão vegetal com vapor d'água**. *Revista Tecnologia*, v. 43, n. 1, p. 45–52, 2022. DOI: 10.5935/0104-1428.20220007

SOUZA, M. A. et al. **Development of multifunctional activated carbon from coconut husks: Combined chemical and physical activation**. *\*Materials Chemistry and Physics\**, v. 295, 2024.

SOUZA, M. R. et al. **Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos**. *Química Nova*, v. 31, n. 5, p. 1040-1044, 2008.

SULTANA, Marzia; ROWNOK, Mahbub Hasan; SABRIN, Meherunnesa; et al. **A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption**. *Cleaner Engineering and Technology*, [S. l.], v. 5, p. 100305, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100305>.

SUN, R. et al. Hemicelluloses: structure and properties. In: PAN, X.; ZHU, J. Y.; WANG, L. (org.). **Lignocellulose biorefinery engineering: principles and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2016. Cap. 6, p. 145–186.

TEIXEIRA, J. L.; ALVES, A. K. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco da Bahia**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS\\_38db7a1fa9e88d3f0521d5308e410461](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS_38db7a1fa9e88d3f0521d5308e410461). Acesso em: 26 maio 2025.

TSAMBA, A. J.; YANG, W.; BLASIAK, W. **Pyrolysis characteristics and global kinetics of coconut and cashew nut shells**. *Fuel Processing Technology*, v. 87, p. 523-530, 2006.

UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Trabalho acadêmico sobre ativação de carvões**. Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br>. Acesso em: 12 maio 2025.

YAMAN, S. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks**. *Energy Conversion and Management*, v. 45, n. 5, p. 651-671, 2004.

ZULFIQAR, M. et al. **Phosphoric acid activation of coconut shell-based carbon: A route to sustainable adsorbents**. *\*Renewable Energy\**, v. 189, p. 802-810, 2023