



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS

CURSO DE BACHARELADO EM QUÍMICA

LUCAS SILVA COELHO MOTA

**MODIFICAÇÃO DA FIBRA DO COCO POR CARBONIZAÇÃO
HIDROTÉRMICA: ADSORVENTE DE ALTO DESEMPENHO NA REMOÇÃO
DE AZUL DE METILENO EM SOLUÇÃO AQUOSA**

FORTALEZA

2025

LUCAS SILVA COELHO MOTA

MODIFICAÇÃO DA FIBRA DO COCO POR CARBONIZAÇÃO
HIDROTÉRMICA: ADSORVENTE DE ALTA QUALIDADE NA REMOÇÃO DE
AZUL DE METILENO EM SOLUÇÃO AQUOSA

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Química Bacharelado da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador: Prof. Dr. Adonay Rodrigues Loiola.

Coorientador: Prof. Dr. Ari Clesius Alves de Lima

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M871m Mota, Lucas Silva Coelho.

Modificação da fibra do coco por carbonização hidrotérmica : adsorvente de alto desempenho na remoção de azul de metileno em solução aquosa / Lucas Silva Coelho Mota. – 2025.

32 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Adonay Rodrigues Loiola.

Coorientação: Prof. Dr. Ari Clesius Alves de Lima.

1. Fibra do coco. 2. Carbonização hidrotérmica. 3. Adsorção. 4. Corantes. 5. Azul de metileno. I. Título.

CDD 540

LUCAS SILVA COELHO MOTA

MODIFICAÇÃO DA FIBRA DO COCO POR CARBONIZAÇÃO
HIDROTÉRMICA: ADSORVENTE DE ALTA QUALIDADE NA REMOÇÃO DE
AZUL DE METILENO EM SOLUÇÃO AQUOSA

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Química Bacharelado da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química.

Aprovada em: 01/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adonay Loiola (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Ari Clesius Alves de Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ma. Ingrid Aragão Lima Azevedo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Leonardo e Nívia.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Adonay Rodrigues Loiola, pela excelente orientação e paciência durante o período do TCC. Foi de grande importância todos os conselhos e sugestões durante o trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora Ari Clesius Alves de Lima e Ingrid Aragão Lima Azevedo pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A minha noiva Lara Fernanda Bezerra Sampaio, por todo o incentivo, amor e apoio durante todo o curso e, especialmente, durante a elaboração deste trabalho. Que nunca deixou eu me desanimar ou pensar em desistir. Se este trabalho está concluído, muito se deve a sua ajuda. Obrigado meu amor.

Ao meu irmão Matheus Silva Coelho Mota, por anos de ajuda, companheirismo e conselhos valiosos durante todo o tempo de graduação.

A minha família, que sempre esteve presente e me mantendo motivado para sempre buscar adquirir mais conhecimento.

Aos integrantes do laboratório de materiais nanoestruturados (LMN), por todo auxílio e ajuda prestadas durante o tempo de desenvolvimento deste trabalho, muita gratidão por todos.

Aos meus amigos feitos nessa caminhada universitária, que me ajudaram tirando dúvidas sobre o trabalho e tornar essa jornada mais leve.

A central analítica da UFC, pela disponibilidade de utilização dos equipamentos para as análises das amostras, sem isso, este trabalho não seria concluído de forma tão satisfatória.

“A única maneira de ficar realmente satisfeito é fazer o que você acredita ser um excelente trabalho. E a única maneira de fazer um excelente trabalho é amar o que você faz.” (STEVE JOBS, 2005).

RESUMO

A fibra do coco, tradicionalmente considerada um resíduo agrícola de baixo valor, tem despertado interesse por seu potencial de reaproveitamento em aplicações ambientalmente sustentáveis. O presente trabalho tem como objetivo investigar a conversão da fibra do coco por meio do processo de carbonização hidrotérmica (CHT), avaliando sua viabilidade como material adsorvente para contaminantes como corantes e metais pesados. Justifica-se a escolha do tema pela crescente geração de resíduos provenientes da cocoicultura, especialmente em estados produtores como o Ceará, responsável por 27% da produção nacional de coco. A metodologia adotada envolveu a submissão da fibra à CHT em reator fechado, sob temperatura de 180 °C por 6 horas, gerando um subproduto carbonizado com características adsorventes. O trabalho busca não apenas agregar valor a um resíduo subutilizado, mas também propor uma alternativa tecnológica e ambientalmente viável para o problema do descarte inadequado do coco. A análise do material resultante será feita com base em técnicas físico-químicas de caracterização e testes de adsorção com corantes modelo. Os resultados esperados incluem a obtenção de um material com estrutura porosa e funcionalização superficial adequada para processos de remoção de poluentes em meio aquoso. Conclui-se que a aplicação da CHT à fibra do coco representa uma estratégia promissora para transformar um passivo ambiental em um insumo útil, contribuindo com o desenvolvimento de tecnologias limpas, a economia circular e o aproveitamento de fontes renováveis. Este estudo reforça a importância da interdisciplinaridade entre áreas como química, engenharia ambiental e agronegócio na busca por soluções sustentáveis e inovadoras para os desafios ambientais contemporâneos.

Palavras-chave: fibra do coco; carbonização hidrotérmica; adsorção; corantes; azul de metileno.

ABSTRACT

Coconut fiber, traditionally considered a low-value agricultural waste, has gained interest for its potential reuse in environmentally sustainable applications. This study aims to investigate the conversion of coconut fiber through the hydrothermal carbonization (HTC) process, evaluating its feasibility as an adsorbent material for contaminants such as dyes and heavy metals. The choice of topic is justified by the increasing generation of waste from coconut farming, especially in producing states like Ceará, which accounts for 27% of Brazil's national coconut production. The adopted methodology involved subjecting the fiber to HTC in a sealed reactor at 180 °C for 6 hours, resulting in a carbonized by-product with adsorptive properties. The study seeks not only to add value to an underutilized waste material but also to propose a technologically and environmentally viable alternative to the improper disposal of coconut waste. The resulting material will be analyzed using physicochemical characterization techniques and adsorption tests with model dyes. Expected results include obtaining a material with a porous structure and suitable surface functionalization for pollutant removal in aqueous media. It is concluded that applying HTC to coconut fiber represents a promising strategy to transform environmental liability into a valuable input, contributing to the development of clean technologies, the circular economy, and the use of renewable and abundant resources. This study highlights the importance of interdisciplinarity between fields such as chemistry, environmental engineering, and agribusiness in seeking sustainable and innovative solutions to contemporary environmental challenges.

Keywords: coconut fiber; hydrothermal carbonization; adsorption; dye; methylene blue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Coco partido ao meio	16
Figura 2. Fluxograma do funcionamento do processo de carbonização hidrotérmica ..	17
Figura 3. Sequência de processos para a Trituração do coco	20
Figura 4. Esboço do tratamento de carbonização hidrotérmica.....	21
Figura 5. FCC1 após a carbonização hidrotérmica	21
Figura 6. FCC2 após a carbonização hidrotérmica	21
Figura 7. Esquema do teste de efeito da massa na adsorção em batelada.	23
Figura 8. Esquema do teste de efeito cinético na adsorção em batelada.	23
Figura 9. Espectros vibracionais na região do infravermelho da: (a) FC, (b) FCC1 e (c) FCC2.....	24
Figura 10. Gráfico do resultado de adsorção para massa ideal. (a) FC; (b) FCC1 e (c) FCC2.....	26
Figura 11. Cinética de adsorção do azul de metileno	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tabela comparativa entre os percentuais de remoção de azul de metileno em função da massa de adsorvente usada.....	26
Tabela 2: Tabela comparativa entre os percentuais de remoção de azul de metileno em função do tempo de adsorção.	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CHT	Carbonização hidrotérmica
FC	Fibra do coco
FCC	Fibra do coco carbonizada
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
MW	Megawatts
ppm	Parte por milhão
rpm	Rotação por minuto
UV-VIS	Ultravioleta-Visível

SUMÁRIO

1 Introdução	13
2 Revisão bibliográfica	15
2.1 Biomassa.....	15
2.2 Problemática do coco no Brasil	15
2.3 Coco.....	16
2.4 Carbonização hidrotérmica.....	17
2.5 Corantes	17
2.6 Adsorção	18
3 Objetivos.....	19
3.1 Objetivo principal.....	19
3.2 Objetivos específicos	19
4 Procedimentos experimentais	20
4.1 Pré-tratamento	20
4.2 Síntese da FCC	20
5 Caracterização	21
5.1 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho (FTIR)	21
5.2 Adsorção em batelada.....	22
5.3 Efeito da massa do adsorvente	22
5.4 Estudo cinético de adsorção do azul de metileno	23
6 Resultados e discussão	24
6.1 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho.....	24
6.2 Testes de adsorção	25
6.2.1 Massa ideal de adsorvente	25
6.2.2 Cinética de adsorção.....	27
7 Conclusão	29
8 Referências	30

1 INTRODUÇÃO

O coco tem importância imensa para a sociedade e grande relevância no mercado nacional e internacional. A chamada cocoicultura gera diversos empregos, estima-se que somando de forma direta e indireta, a cada 1 ha de produção de coco, 7 profissionais estão envolvidos na cadeia de produção (DIKOKO, 2021). Toda essa importância vem de décadas de investimento do governo federal, que concedeu crédito a produtores rurais para modernizar e escalar a produção do coco. No Ceará, a importância é ainda mais acentuada, pois o estado é o maior produtor nacional de coco, sendo responsáveis por 27% do total nacional, uma vez que na safra de 2023/2024 foram produzidas cerca de 622 mil toneladas de coco, dando retorno de 289 milhões de reais para o Estado do Ceará (AGRO SUSTENTAR, 2025).

Toda essa importância tem um revés. Grandes produções de coco levam também a grandes aterros de coco espalhados por todo o território, especialmente no litoral nordestino, onde a produção é mais intensa (EMBRAPA, 2021). Com isso, surgiu a necessidade de tentar reciclar, reutilizar e reaproveitar as partes do coco para diminuir os impactos do descarte inadequado de coco, pois o acúmulo desse material representa grande problema de gestão sanitária, tanto na parte rural, quanto na parte urbana. Atualmente, grande parte da produção é destinada para o consumo in natura do fruto, porém, com o avanço de tecnologias e tendências, o mercado de coco ampliou-se para além do fruto em si, tendo produtos à base de coco, por exemplo óleo de coco, sabão de coco, leite de coco e outros produtos consumidos diariamente pela população.

Todos esses produtos foram iniciativas para reduzir a quantidade de coco nos lixões, na busca de aproveitar o máximo do fruto. Ainda assim, o aproveitamento do coco foi de no máximo 30% de seu peso, de acordo com dados recolhidos pela EMBRAPA (2021), isso quer dizer que para um coco que tenha em média 2 kg, cerca de 1,4 kg são desperdiçados, dentre as partes desperdiçadas, a casca do coco e a fibra são as que tem menos utilidade econômica quando comparada a polpa, porém, com o avanço científico, soluções para o desuso das partes do coco foram aparecendo e iniciando o processo de reciclagem dos subprodutos do coco. Entre as partes do coco, a fibra do coco, objeto de estudo deste trabalho, é a que mais se destaca pela sua variedade de uso, desde a parte agrícola, o potencial uso passa para a indústria calçadista, até produtos artesanais, além

de quando misturado com outros produtos naturais, a área de aplicação fica ainda mais vasta, indo para a indústria de estofados.

Diante do exposto acima, é perceptível a grande abrangência da fibra do coco no mercado nacional. No entanto, há espaço para mais aplicações, visto que no âmbito químico, a fibra do coco, quando submetida por tratamento de carbonização hidrotérmica, seu sub produto carbonizado pode ser aplicado em processos de adsorção de corantes, como o azul de metileno ou até mesmo em metais pesados.

Portanto, este trabalho tem como propósito investigar a conversão da fibra do coco por meio da carbonização hidrotérmica (CHT), avaliando seu potencial como material adsorvente. A pesquisa visa não apenas agregar valor a um resíduo agrícola subutilizado, mas também contribuir com uma solução ambiental viável para o problema do descarte inadequado do coco. Assim, espera-se que os resultados desta pesquisa reforcem a importância de estratégias sustentáveis e interdisciplinares no enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos, promovendo o desenvolvimento de novas tecnologias limpas a partir de fontes renováveis e abundantes, como a fibra do coco.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será abordado conceitos importantes sobre os assuntos estudados no trabalho para melhor entendimento.

2.1 Biomassa

Devido as altas quantidades de CO₂, o uso de energias renováveis tornou-se necessário para diminuir os efeitos dos gases do efeito estufa. Por isso, houve um aumento no número de estudos com o tema voltado a obtenção de biomassa, como forma de substituir as fontes de energias convencionais. A etimologia da palavra biomassa já sugere, o prefixo -bio significa ``vida'', dessa forma, biomassa é matéria sólida ou pastosa de origem animal ou vegetal, que tem possibilidade de ser transformada em energia.

A biomassa é uma fonte de energia considerada renovável e sustentável, no ano de 2023, foram gerados 3.218 MW médios de energia. O que significou 4,6% de toda a demanda energética, segundo o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2023).

No Brasil, a biomassa pode ser transformada em bioenergia por diversas matérias primas. De acordo com Vaz Júnior (2013), as classes de biomassa são divididas em quatro grupos: (1) o das oleaginosas, que compõem a soja, o algodão, o amendoim e o girassol, usados como insumo na produção de biodiesel; (2) o grupo das matérias primas sacarídeas, composto pela cana-de-açúcar e pela beterraba, com utilidade na produção de etanol; (3) o grupo das amiláceas, produtoras de amido, o qual pode ser utilizado para produção de biocombustível, produção de alimentos e de medicamentos é composta por, principalmente, arroz e milho e (4) o grupo das matérias primas lignocelulosicas que contém, especialmente, celulose, que também se dá para a utilização da hemicelulose e lignina na obtenção de compostos renováveis de diversas aplicações.

2.2 Problemática do coco no Brasil

Dentre as matérias primas lignocelulosicas, a fibra do coco é pobre em celulose, hemicelulose e lignina. Porém, o aproveitamento total desses macros componentes viabiliza seu uso industrial e contribui com a redução do impacto ambiental de sua deposição inadequada, formando lixões, segundo Almeida et al. (2014). De acordo com a EMBRAPA (2021), no Brasil são produzidos cerca de 1,1 milhão de frutos com peso médio de 0,9 kg. Com rendimento de 30% de fibra e 70% de pó no processo industrial, o subproduto desse processo industrial são as cascas, que no país, há um

potencial de produção de 804,218 t de casca que, após a industrialização, resultariam em 241,265 t de fibra e 562,953 t de pó. A EMBRAPA também mostra que pouco mais de 70% do coco consumido é descartado no meio ambiente. Fazendo um recorte para Estado do Ceará, como exposto na introdução, o estado nordestino é o maior produtor nacional de coco, que já dá uma noção dos impactos causados no Estado por causa do coco. Além disso, Fortaleza por ser uma cidade turística e litorânea, acaba por atrair bastantes turistas em diversos períodos do ano, que ao procurar por praias, consomem grande quantidade de coco, que ao fim, será, por muitas vezes, descartado de maneira incorreta. Mesmo com vários produtos derivados do coco, utilizando parte da fibra, as quantidades ainda descartadas no ambiente são bastante elevadas. Diante da problemática, o trabalho busca formas de reaproveitar a fibra do coco para mitigar os impactos deixados.

2.3 Coco

Nascido a partir do coqueiro *Cocos nucifera* L, o coco é um fruto do tipo drupa, ou seja, trata-se de um fruto carnoso que apresenta apenas uma semente. O coco é formado por uma casca lisa (endocarpo), a qual envolve o mesocarpo, que se destaca por ser fibroso e espesso. Mais internamente há o endocarpo, o qual se destaca por ser uma camada dura que envolve a semente (MUNDO EDUCAÇÃO, 2025), como é mostrado na Figura 1. O objeto de estudo deste trabalho é a fibra do coco, caracterizado pelo mesocarpo, que tem cerca de 3 a 5 centímetros de espessura e sempre que extraída, origina algum derivado. Segundo o Serviço Social da Indústria de São Paulo (SESI-SP), o coco teve sua origem no sudeste da Ásia e por meio dos portugueses, a fruta foi introduzida no território brasileiro em 1553. No Brasil, grande parte da produção de coco está concentrada na região nordeste, especialmente na Bahia, Ceará, Pernambuco e Sergipe.

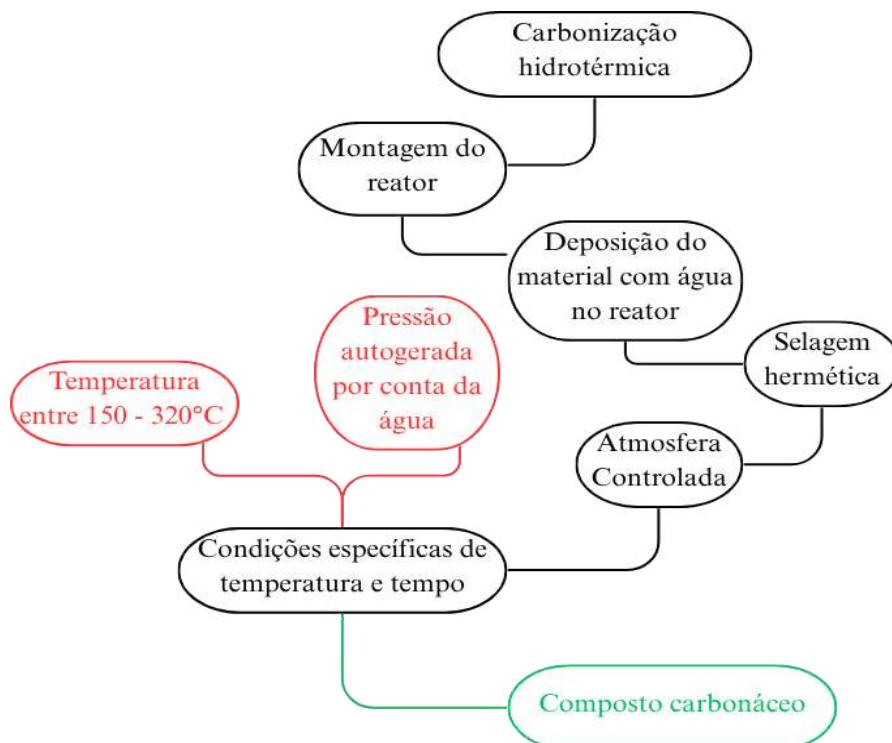
Figura 1. Coco partido ao meio



2.4 Carbonização hidrotérmica

A carbonização hidrotérmica (CHT) é o processo de conversão com o fornecimento de calor ao meio para converter matérias-primas de biomassa, geralmente úmidas, em produtos ricos em carbono, chamado de hidrocarvão. Geralmente a CHT é realizada em temperaturas entre 150 – 320°C, com o tempo de residência variando de acordo com o material, conforme é mostrado no fluxograma da Figura 2.

Figura 2. Fluxograma do funcionamento do processo de carbonização hidrotérmica.



(Elaborado pelo autor)

Conforme exposto no fluxograma acima, a reação da CHT ocorre dentro de um reator selado, que ao colocar a mistura dentro, é hermeticamente fechado em atmosfera controlada de O₂. Feito isso, a reação ocorre por um determinado tempo com pressão autogerada devido à água aquecida no sistema fechado, onde vai ocorrer as reações que vão originar o composto carbonáceo. Sabendo como funciona o processo de CHT, é possível citar e comparar as vantagens em reação a um outro método, por exemplo a pirólise, a vantagem da CHT frente a pirolise é a capacidade de conseguir tratar resíduos úmidos sem realizar pré-secagem, pois a água atua como bom meio para a transferência de calor. (SIVAPRASAD; MANANDHAR; SHAH, 2021).

2.5 Corantes

Corantes são soluções com cor característica que de alguma forma, seja por

absorção ou adsorção, se fixam em outro material, geralmente sólido. Dessa forma, sua aplicação se dá na coloração de materiais como tecidos, couro e outras diversas aplicações. Anteriormente, os corantes eram extraídos de plantas, como o Pau-Brasil, mas com as novas tendências, houve a necessidade de sintetizar os corantes, afim de produzir em larga escala os corantes e não devastar árvores para extrair o pigmento que dará origem ao corante (MARTINS, 2024).

Os corantes sintéticos foram uma revolução para a indústria têxtil, oferecendo enorme leque de opções de cores, porém esse revolvimento trouxe uma discussão sobre os riscos ambientais e formas de descartar de maneira correta. Acredita-se que, no Brasil, cerca de 20% dos corantes não tem um descarte específico, sendo então, descartado como efluente, (ZANONI, 2017).

2.6 Adsorção

A adsorção, de forma geral, é um fenômeno de transporte de massa, onde há coleta de massa em solução. Os compostos indesejados serão depositados na superfície do material com potencial adsorção. A capacidade de adsorção do material vai depender de fatores físico-químicos entre o adsorvente e o adsorvato, comumente, os melhores adsorventes estão na fase sólida devido ao adsorvato está geralmente junto a um fluido. Existem dois tipos de adsorção, química ou física, de forma resumida, a adsorção química é mais forte, devido à transferência de elétrons e, também, há uma modificação na superfície do adsorvente, enquanto na adsorção física prevalecem as forças de van der Walls (NASCIMENTO, 2014).

Muitos trabalhos mostram a eficiência de materiais adsorventes partindo de matérias primas renováveis. Por exemplo, pode ser citado o caroço de manga (SOUSA et al., 2024), a casca de tamboril (RIBEIRO et al., 2023), a pele prata do café (CALCIOLARI et al., 2022), o bambu (TEIXEIRA et al., 2022), dentre outros. Isso mostra a tendência de utilizar esse tipo de matéria prima para criar adsorventes de baixo custo e de alta eficiência. Neste trabalho, o insumo de baixo custo foi o coco, para ser mais preciso, a fibra, e para o teste de adsorção foi escolhido o azul de metileno.

3 Objetivos

3.1 Objetivo principal

Conversão da fibra do coco em hidrochar por meio da técnica de carbonização hidrotérmica visando a obtenção de materiais carbonáceos para avaliar suas condições para aplicação de adsorção.

3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os produtos obtidos quanto à morfologia, composição elementar e estrutura química;
- Investigar o rendimento e a eficiência do processo de carbonização hidrotérmica aplicado à fibra de coco;
- Mensurar, por meio do processo de adsorção, a eficiência do material na retenção do corante.

4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Pré-tratamento

Inicialmente, foi recolhido o coco por inteiro, posteriormente, foi realizada a separação da fibra do coco (mesocarpo) do restante do material. Quando o mesocarpo foi totalmente separado, a fibra passou pelo processo de trituração, onde o objetivo foi aumentar a superfície de contato e a realização da carbonização hidrotérmica (CHT) acontecer de forma mais efetiva. A trituração foi realizada utilizando um liquidificador comum, onde a fibra foi misturada com água em proporção 1g da fibra para 100 mL de água destilada a fim de facilitar o contato da fibra com a lâmina do liquidificador. A mistura foi colocada na estufa para secagem a 100 °C, como mostra a Figura 3 abaixo.

Figura 3. Sequência de processos para a trituração do coco



4.2 Síntese da FCC

A síntese do material foi realizada pelo processo de carbonização hidrotérmica (CHT), primeiramente, foi misturado 1 g da fibra do coco para 35 mL de água, para que toda a fibra ficasse submersa em água, a mistura foi então colocada no reator de teflon e vedada seguindo o procedimento padrão, as condições de 180 °C por 6 horas. Após o período de CHT, a fibra foi retirada do reator e adquiriu uma coloração mais escura e com aroma de café, evidenciando que o procedimento foi realizado com sucesso, como ilustra a Figura 4 abaixo. Então, a fibra do coco carbonizada (FCC) foi posta na estufa para uma nova secagem e por fim, armazenada em um frasco adequado e colocado no dessecador.

Foram obtidas duas amostras de FCC, a FCC1, onde o controle de temperatura não foi rígido, variando entre 180 – 190°C e a FCC2, na qual o controle de temperatura foi minucioso e variou entre 180 – 182°C, isso é mostrado nas Figura 5 e 6.

Figura 4. Esboço do tratamento de carbonização hidrotérmica.

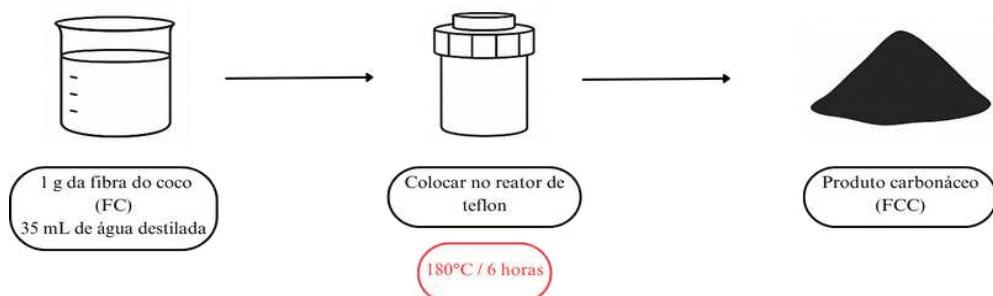


Figura 5. FCC1 após a carbonização hidrotérmica



Figura 6. FCC2 apóas a carbonização hidrotérmica



5 CARACTERIZAÇÃO

5.1 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho (FTIR)

As medidas foram feitas a fim de identificar os grupos funcionais presentes nos materiais, assim como, desvendar as modificações na estrutura do composto após o

processo de CHT. Para a análise de espectroscopia vibracional na região do infravermelho, foram preparadas pastilhas de KBr com as amostras FC, FCC1 e FCC2. O material foi analisado no equipamento IRTtracer-100 – Shimadzu, da Central Analítica da UFC.

5.2 Adsorção em batelada

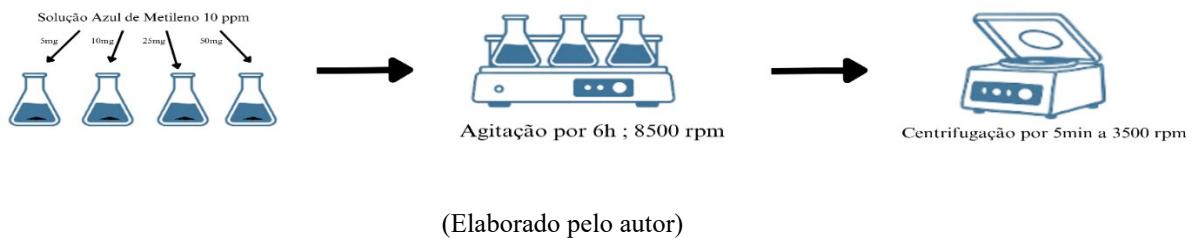
Os testes de adsorção foram realizados de forma batelada, isso significa que o adsorvente, que no caso é a fibra do coco carbonizada (FCC), vai interagir com um corante, que será o azul de metíleno, para representar um fluido, chamado de adsorvato. Neste processo, o adsorvente e o adsorvato foram colocados em contato para avaliar a capacidade de adsorção da FCC. As medidas foram realizadas em duplicata, utilizando Erlenmeyers de 250 mL. A determinação das concentrações do tratamento de adsorção foi realizada por meio da técnica de espectrofotometria na região UV-VIS. As leituras foram realizadas no pico de absorbância entre 660 – 665 nm.

Para realizar as análises, anteriormente foi preciso calibrar o equipamento, para isso, soluções padrão de azul de metíleno nas concentrações $0,15 \text{ mg L}^{-1}$, $0,31 \text{ mg L}^{-1}$, $0,62 \text{ mg L}^{-1}$, $1,25 \text{ mg L}^{-1}$; $2,5 \text{ mg L}^{-1}$; $5,0 \text{ mg L}^{-1}$, $7,5 \text{ mg L}^{-1}$; $10,0 \text{ mg L}^{-1}$, foram preparadas e utilizadas para construir a curva de calibração.

5.3 Efeito da massa do adsorvente

Para verificar a massa ótima do material FCC para adsorver o azul de metíleno, foi utilizada a solução de azul de metíleno $10,0 \text{ mg L}^{-1}$ preparada previamente. Os testes foram realizados em duplicata, e em Erlenmeyers de 250 mL foi acrescido massas diferentes de FCC, foram 5 mg, 10 mg, 25 mg e 50 mg. Posteriormente, foi acrescido em cada Erlenmeyer uma alíquota de 20 mL da solução de azul de metíleno 10 ppm. A mistura foi agitada por 6 horas a 8500 rpm e o adsorvato foi recolhido e centrifugado a 3500 rpm por 5 minutos, como mostra a Figura 7. Em seguida, as concentrações finais do azul de metíleno foram determinados por espectrofotometria e feitas o tratamento matemático com a finalidade de se obter um melhor entendimento sobre a eficiência da fibra.

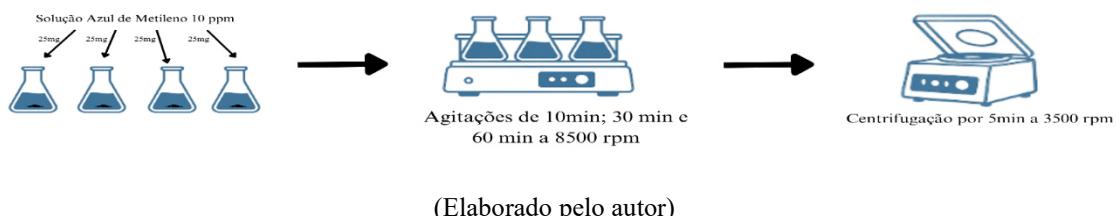
Figura 7. Esquema do teste de efeito da massa na adsorção em batelada.



5.4 Estudo cinético de adsorção do azul de metileno

De forma semelhante a seção 5.3, o estudo cinético foi conduzido, porém fixando a massa de FCC em 25 mg e a concentração de azul de metileno em 10 ppm, porém variando os tempos, foram definidos os tempos de 10, 30 e 60 minutos, como mostra a Figura 8

Figura 8. Esquema do teste de efeito cinético na adsorção em batelada.

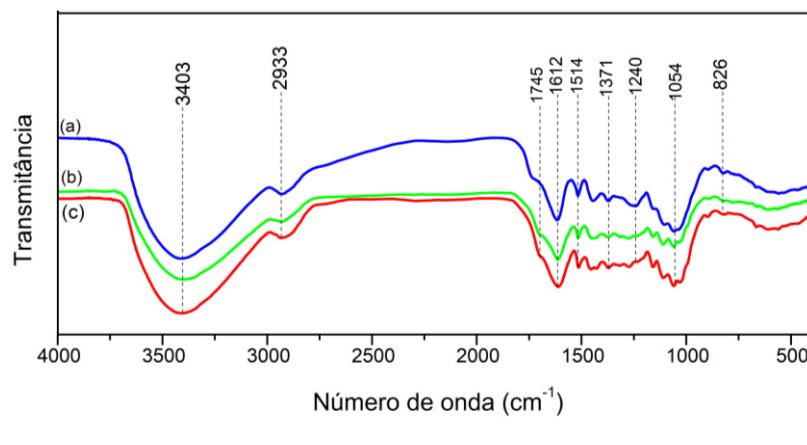


6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho

Na Figura 9, é mostrada os espectros vibracionais de FTIR das amostras FC, FCC1 e FCC2.

Figura 9. Espectros vibracionais na região do infravermelho da: (a) FC, (b) FCC1 e (c) FCC2.



(Elaborado pelo autor)

Conforme Hernández Vidal et al. (2018) e Garcia Filho et al. (2018), as bandas características da fibra do coco podem ser observadas em 3400 cm^{-1} , 2933 cm^{-1} , 2280 cm^{-1} , 1705 cm^{-1} , 1612 cm^{-1} , 1371 cm^{-1} , 1240 cm^{-1} , 1054 cm^{-1} e 826 cm^{-1} .

Em todos os espectros, as bandas características foram apresentadas. Perto dos 3500 cm^{-1} indica a presença de estiramento O-H, na faixa próxima a 3000 cm^{-1} há estiramento C-H de carbono sp³, apontando a aparição de grupos alcanos.

Partindo para a faixa de 1745 cm^{-1} , observa-se estiramento C=O, que pode estar associado a hemicelulose ou a lignina, por isso, há uma leve deformação no espectro nas bandas mais próximas a 1745 cm^{-1} .

Já na banda de 1612 cm^{-1} tem a presença do estiramento C=C mais vibração do anel aromático, assinalando a presença da lignina, nas Figura 9b e 5c, a aparição da banda correspondente está menor, assinalando decréscimo na concentração da lignina. Esse desaparecimento da lignina também está associado na suavização do espectro em 1745 cm^{-1} , citado acima. Outra evidencia está na faixa de 1514 cm^{-1} , que está relacionada com a vibração do anel aromático (radical arila), que diminui sua intensidade após o processo de CHT.

Na faixa de 1371 cm^{-1} , a deformação C-H assimétrica indica presença dos três componentes da fibra do coco, celulose, hemicelulose e lignina. Por isso, no espectro não há uma alteração significativa entre as Figura 9a, 5b e 5c.

Em 1315 cm^{-1} , a banda característica da deformação angular no plano de CH_2 , indica a presença da celulose, na Figura 9a, tem a presença do composto, porém, na Figura 9b, sua presença fica mais evidente devido ao desaparecimento dos outros dois componentes principais e de impurezas do próprio material.

Em 1240 cm^{-1} , tem-se mais indícios do desaparecimento da hemicelulose e lignina, pois na Figura 9a, encontra-se a banda em 1240 cm^{-1} , enquanto na Figura 9bc a mesma banda foi suavizada.

Na região de 1054 cm^{-1} , na Figura 9a observou-se uma banda atribuída ao grupo alquil éter da celulose, atrelado com estiramento C-O de álcool primário. Estas bandas ficaram mais intensas à medida que ocorreu o processo de carbonização, indicando novamente, a redução nas porcentagens dos outros compostos.

Por fim, na região de 826 cm^{-1} , onde está localizado deformações de benzenos e derivados, foi observado, na Figura 9, a presença da banda, enquanto que na Figura 9c quase não é possível identificar e na Figura 9b já não há evidencia da banda. Essas bandas estão mostrando as deformações da região aromática da lignina, que ao submetida ao processo de CHT, foi desaparecendo.

6.2 Testes de adsorção

Os testes de adsorção de azul de metileno pelas amostras de FC, FCC1, FCC2 foram realizados em duplicata e os resultados estão dispostos nas figuras abaixo com suas respectivas descrições e discussões.

6.2.1 Massa ideal de adsorvente

O teste de adsorção da massa ideal foi feito para entender como a quantidade de adsorvente afeta o resultado e, assim, determinar qual a quantidade mais adequada para usar nos próximos testes.

A Tabela 1 mostra os percentuais de remoção em função da massa de adsorvente. Esses dados foram assim dispostos para uma melhor elucidação das informações presentes, juntamente com o gráfico da Figura 10 para visualização ampla dos resultados.

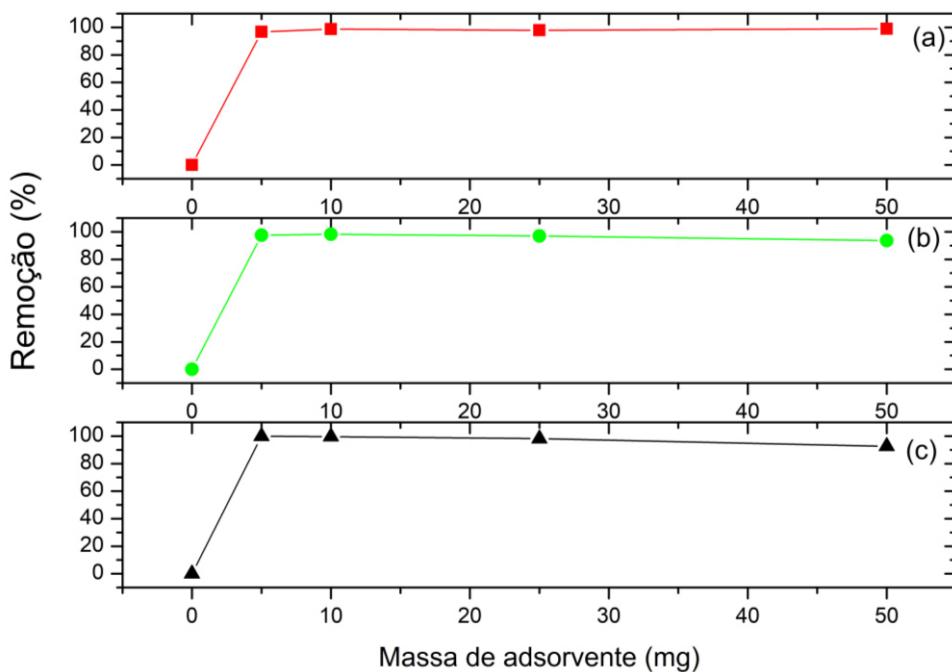
Tabela 1. Tabela comparativa entre os percentuais de remoção de azul de metileno em função da massa de adsorvente usada.

Massa (mg)	FC (%)	FCC1 (%)	FCC2 (%)
0	0	0	0
5	96,7	97,6	99,9
10	98,7	98,2	99,6
25	97,9	97,0	98,1
50	98,9	93,7	92,6

(Elaborado pelo autor)

A Figura 10 vai reunir os dados da Tabela 1 e mostrar, de forma gráfica, os resultados para as três amostras da fibra do coco, que traz o percentual de remoção do azul de metileno em função das massas de FC, FCC1 e FCC2.

Figura 10. Gráfico do resultado de adsorção para massa ideal. (a) FC; (b) FCC1 e (c) FCC2



(Elaborado pelo autor)

Tanto na Tabela 1 quanto na Figura 10 é observado alta remoção do adsorvato, o azul de metileno a 10 ppm, mesmo com quantidades pequenas de adsorvente, a remoção do corante foi próxima dos 100%, até na amostra FC, que é apenas a fibra do coco sem tratamento de carbonização.

Portanto isso leva a concluir que qualquer massa estudada de qualquer amostra terá eficiência para os testes posteriores.

6.2.2 Cinética de adsorção

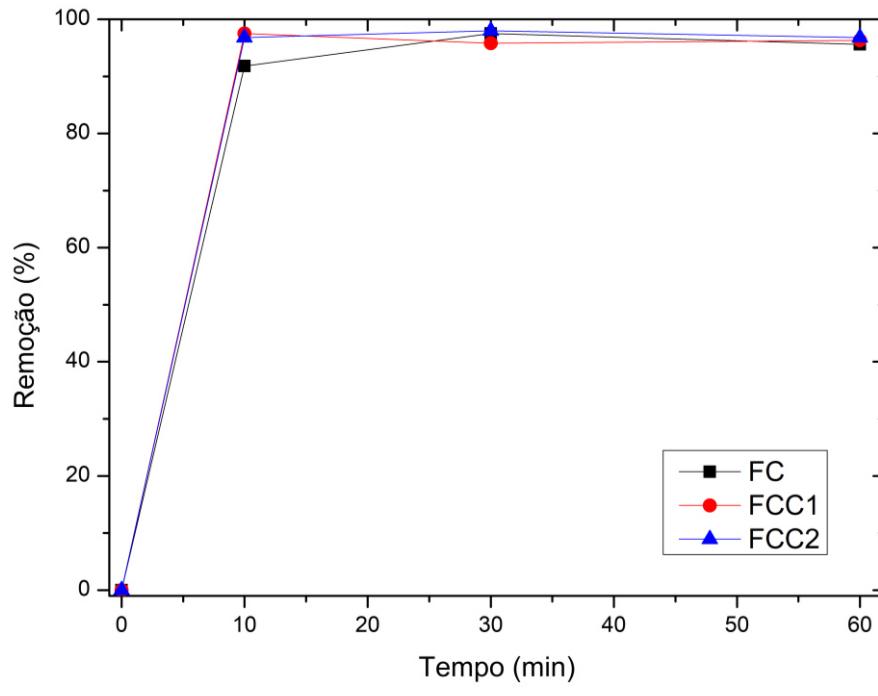
A porcentagem de remoção está altamente dependente da concentração inicial do adsorvato, o efeito de adsorção depende da disponibilidade de sítios ativos na superfície do adsorvente. As curvas cinéticas foram obtidas e determinadas pelo percentual de remoção em função do tempo de agitação. Foram usados 25 mg de cada amostra, sem a necessidade de usar uma quantidade tão alta, por facilidade de uso e amostragem significativa, essa dosagem foi escolhida. Os resultados de cada amostra estão dispostos na Tabela 2 e na Figura 11.

Tabela 2: Tabela comparativa entre os percentuais de remoção de azul de metileno em função do tempo de adsorção.

Tempo (min)	FC (%)	FCC1 (%)	FCC2 (%)
0	0	0	0
10	91,8	97,5	96,8
30	97,5	95,8	98,0
60	95,6	96,3	96,8

(Elaborado pelo autor)

Figura 11. Cinética de adsorção do azul de metileno



(Elaborado pelo autor)

Pela análise do gráfico da Figura 11, observa-se que a partir do tempo de 10 min, se tem uma adsorção bem elevada, mesmo a FC, amostra sem nenhum tratamento, obteve uma porcentagem elevada, porém, quando comparada as amostras FCC1 e FCC2, que obtiveram maior desempenho no mesmo tempo. Isso mostra que o processo de CHT foi executado com êxito.

7 CONCLUSÃO

Foi observado que, apesar do pré-tratamento de Trituração não ter sido de forma uniforme, com granulometria bem definida. os resultados obtidos tem embasamento respaldado na literatura e em trabalhos relacionados.

O processo de carbonização para as amostras FCC1 e FCC2 se mostraram eficientes quando comparada a amostra FC, sem tratamento hidrotérmico. A diferença entre a duas amostras carbonizadas foi que a FCC1 não foi possível ter controle minucioso da temperatura de carbonização, enquanto que a FCC2, o cuidado com a temperatura foi mais rigoroso. E por isso, alguns resultados da FCC1 apresentaram diferenças sutis da FCC2 em alguns quesitos.

Os resultados obtidos das técnicas de caracterização como FTIR e os testes de adsorção em batelada, apontaram para a obtenção de um material com maior capacidade de adsorção, ou seja, uma maior disponibilidade de sítios ativos em sua superfície. Com os testes de adsorção, foi possível esclarecer a necessidade de massa do adsorvente e tempo de agitação para otimizar o uso do material.

Por fim, pode-se relatar que os objetivos propostos para este trabalho foram concluídos, desde o objetivo geral de transformar a fibra do coco em hidrochar por meio da carbonização hidrotérmica, até os objetivos específicos de caracterização do material carbonáceo, aplicação de adsorção e aferição do potencial adsorvente do material.

8 REFERÊNCIAS

1. AGRO SUSTENTAR. Maiores produtores de coco da baía do Brasil. Disponível em: <https://agrosustentar.com.br/agronegocio/produtores-coco-da-baia/>. Acesso em: 17 jul. 2025.
2. AKTAR, M. S. et al. Potentials of bio-adsorbent prepared from coconut fibre in mitigation of pollution from tanning effluent. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 17, 100687, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100687>. Acesso em: 17 jul. 2025
3. BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. Coco: produção e mercado. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, ano 6, n. 206, dez. 2021. (Caderno Setorial ETENE). Disponível em: https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1043/1/2021_CDS_206.pdf. Acesso em: 17 jul. 2025.
4. CALCIOLARI, Débora; TEIXEIRA, Bárbara Santos; ZABINI, Davi; MAFRA, Milene Regina. Remoção do corante azul de metileno de solução aquosa usando biomassa de pele prata de café (coffee silverskin) como bioadsorvente de baixo custo. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 9, e25111931093, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/31093>. Acesso em: 17 jul. 2025.
5. DIKOKO. Coco: cultura vetor econômico para o Brasil. Disponível em: <https://www.dikoko.com.br/cocoilcultura-vetor-economico-para-o-brasil/>. Acesso em: 17 jul. 2025.
6. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Coprodutos do coco. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco/pos-producao/coprodutos>. Acesso em: 17 jul. 2025.
7. ETIM, U. J.; UMOREN, S. A.; EDUOK, U. M. Coconut coir dust as a low cost adsorbent for the removal of cationic dye from aqueous solution. *Journal of Saudi Chemical Society*, v. 20, supl. 1, p. S67–S76, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2012.09.014>. Acesso em: 17 jul. 2025.
8. FASHION REVOLUTION. Forum 2022. Ebook. [S.l.]: Fashion Revolution, 2022. Disponível em: <https://issuu.com/fashionrevolution/docs/ebook-forum-2022/s/17122856>. Acesso em: 17 jul. 2025.
9. FURTADO, Cora Franklina do Carmo; GADELHA, Maria Auriceliana Cézar. Os impactos ambientais do consumo do coco verde na Praia do Futuro em Fortaleza-CE. [S.l.]: Faculdade Integrada da Grande Fortaleza, [s.d.].
10. Garcia Filho, Fabio da Costa; Demosthenes, Luana Cristyne da Cruz; Monteiro, Sergio Neves; Oliveira, Michelle Souza. CARACTERIZAÇÃO DA FIBRA DE COCO (COCUS NUCIFERA L.) POR ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO, p. 3160-3166. In: 73º Congresso Anual da ABM, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-320
11. GOLDEMBERG, José. Biomassa e energia. *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 582–587, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/gmY5LVCKZ5Y3X3wmWppgW5M/?lang=pt>. Acesso em: 17 jul. 2025.
12. GOMES, Matheus Lima et al. Carbonização hidrotérmica a partir da fibra do coco para produção de hidrocarvão. *InovaCiência: Revista Científica Multidisciplinar*, v. 1, n. 1, p. 29–38, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.61407/2763-8017.v1n1.2023.29>. Acesso em: 17 jul. 2025.

13. GUARNIERI, Simone Francieli et al. Coconut fiber biochar alters physical and chemical properties in sandy soils. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 43, e51801, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.51801>. Acesso em: 17 jul. 2025.
14. GUTIÉRREZ CUENCA, Manuel Alberto; PASSOS, Edson Eduardo Melo. A cultura do coqueiro. 2. ed. vers. eletrônica. [S.I.]: Embrapa Tabuleiros Costeiros, ago. 2016. 97 p. (Série Sistema de Produção, 1). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1052944>. Acesso em: 17 jul. 2025.
15. Hernández Vidal, NE, López Bautista, V., Morales Morales, V., Méndez Ordóñez, W., & Calderón Osorio, ES. (2018). Caracterização química de fibra de coco (*Cocos nucifera L.*) do México utilizando espectroscopia infravermelha (FTIR). *Engenharia e Região*, 20 (1), 67–71. <https://doi.org/10.25054/22161325.1914>
16. MANGLA, Divyanshi; IKRAM, Saqqa. Base activated hydrothermal carbonisation of coconut husk and wheat straw for the adsorption of tetracycline and trimethoprim: a comparative approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, [S.I.], 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-023-05064-1>. Acesso em: 17 jul. 2025.
17. MUNDO EDUCAÇÃO. Coco. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/coco.htm>. Acesso em: 29 jul. 2025.
18. MARTINS, Eliane. Corantes em alimentos: da atratividade à segurança e saudabilidade. *Revista da Agroindústria*, n. 59, 2024. Disponível em: <https://revistadaagroindustria.com.br/Pdf/Artigo%20t%C3%A9cnico%2059.2024%20-%20Eliane%20Martins.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.
19. NASCIMENTO, Roniley dos Santos et al. Adsorção altamente eficiente de cádmio (II) em resíduo de fibra de coco. *Revista Virtual de Química*, v. 14, n. 3, p. 656–667, 2022. Disponível em: https://www.rvq-submetralink.com.br/2022_adsorcao_cadmio_coco.pdf. Acesso em: 17 jul. 2025.
20. NASCIMENTO, R. F. D. *Fruticultura: uma abordagem agroecológica*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/10267/1/2014_liv_rfdnascimento.pdf. Acesso em: 04 ago. 2025.
21. NOGUEIRA, Geraldo Daniel Ribeiro. Carbonização hidrotérmica de resíduos de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.): estudo de otimização, caracterização do hidrocarvão e aplicação. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.249>. Acesso em: 17 jul. 2025.
22. OLIVEIRA, Adriana F. de et al. Bioadsorvente de Cu pela fibra do coco. *Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente*, v. 11, n. 1, p. 121–136, 2020. Disponível em: <https://faema.edu.br/ojs/index.php/revistafaema/article/view/815>. Acesso em: 17 jul. 2025.

23. OLIVEIRA, Daniele Maria; GOMES, Matheus Lima; LIMA, Edivaldo. Carbonização hidrotérmica com ácido no bagaço da cana-de-açúcar para produção de hidrocarvão. InovaCiência: Revista Científica Multidisciplinar, v. 1, n. 2, p. 14–23, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.61407/2763-8017.v1n2.2023.14>. Acesso em: 17 jul. 2025.
24. QIN, Xiao et al. A novel activation hydrochar via hydrothermal carbonization followed by chemical activation and its application in supercapacitor. Journal of Energy Storage, v. 60, 107146, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107146>. Acesso em: 17 jul. 2025.
25. RIBEIRO, Marcos Paulo Tavares et al. Adsorção de azul de metileno utilizando carvão ativado preparado a partir da casca do tamboril. Revista Jovens Pesquisadores, Caxias do Sul, v. 13, n. 2, p. 56–67, 2023. ISSN 2238-342X. Disponível em: <https://revistas.ucs.br/index.php/jovenspesquisadores/article/view/14387>. Acesso em: 17 jul. 2025
26. SAKIB, Fahad Md. et al. High removal of crystal violet dye and tetracycline by hydrochloric acid assisted hydrothermal carbonization of algal biomass. Journal of Advanced Industrial Science and Technology, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.38007/JAIST.2021.040101>. Acesso em: 17 jul. 2025.
27. SALVADOR, Érica de Liandra. Corantes: uma breve introdução. TextileIndustry Ning, 24 fev. 2011. Disponível em: <https://textileindustry.ning.com/profiles/blogs/corantes-uma-breve-introducao>. Acesso em: 17 jul. 2025.
28. SHARMA, Vikash Kumar et al. Hydrothermal carbonization of waste biomass for energy generation: a review. Renewable Energy Focus, v. 44, p. 218–235, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.10.004>. Acesso em: 17 jul. 2025.
29. SILVA DE ALMEIDA, J.; MAGALHÃES DO NASCIMENTO, D.; FERREIRA DIAS, A.; FIGUEIRÊDO, M. C. B.; MORAIS, P. S.; ROSA, M. F. Desenvolvimento tecnológico de produtos e processos para o aproveitamento integral da fibra de coco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA (CBQ), 54., 2014, Natal. Anais [...]. Natal: ABQ, 2014. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2014/trabalhos/8/6127-18092.html>. Acesso em: 17 jul. 2025.
30. SIVAPRASAD, Shyam; MANANDHAR, Ashish; SHAH, Ajay. Hydrothermal Carbonization: Upgrading Waste Biomass to Char. Columbus: The Ohio State University Extension, 2021. Disponível em: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-6622>. Acesso em: 17 jul. 2025.
31. SOUSA, Maria Suely Ferreira et al. Adsorção de chumbo (II) em solução aquosa usando carvão ativado de bagaço de coco verde: estudo cinético, isotérmico e termodinâmico. Matéria (Rio de Janeiro), v. 29, e-15366, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0219>. Acesso em: 17 jul. 2025.
32. TEIXEIRA, Bárbara Santos et al. Estudo da eficiência do uso de bambu como bioadsorvente na remoção de azul de metileno. Revista Interface Tecnológica, v. 21, n. 2, p. 34–41, 2022. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/950>. Acesso em: 17 jul. 2025.

33. VAZ JÚNIOR, Sílvio (Ed.). *Biomassa para química verde*. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2013. 196 p. ISBN 978-85-7035-230-9.
34. WERLANG, E. B.; SOUZA SCHNEIDER, R. de C. de; LAWISCH RODRIGUEZ, A.; NIEDERSBERG, C. Produção de carvão ativado a partir de resíduos vegetais. *Revista Jovens Pesquisadores*, Santa Cruz do Sul, v. 3, n. 1, 16 jul. 2013.
35. YADAV, Ankit et al. Process analysis and kinetic modeling of coconut shell hydrothermal carbonization using artificial neural network and response surface methodology. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 14, p. 1581–1596, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02647-5>. Acesso em: 17 jul. 2025.
36. ZANONI, Maria Valnice Boldrin. Corantes. Limeira: Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas – FT/UNICAMP, 2017. Disponível em: <https://wordpress.ft.unicamp.br/wp-content/uploads/sites/33/2017/10/Corantes.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.