

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

MARIANA ÁVILA

**Preparação e caracterização de material carbonoso proveniente do mesocarpo de
coco verde e sua utilização como adsorvente para tratamento de efluentes de biodiesel**

Lorena
2024

MARIANA ÁVILA

Preparação e caracterização de material carbonoso proveniente do mesocarpo de coco verde e sua utilização como adsorvente para tratamento de efluentes de biodiesel

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na área de concentração de Desenvolvimento de Produtos e Processos.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Lúcia Caetano Pinto da Silva

Versão Corrigida

Lorena

2024

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizadoda
Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ávila, Mariana
Preparação e caracterização de material carbonoso
proveniente do mesocarpo de coco verde e sua
utilização como adsorvente para tratamento de
efluentes de biodiese / Mariana Ávila; orientadora
Maria Lúcia Caetano Pinto da Silva - Versão
Corrigida. - Lorena, 2024.
108 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós
Graduação em Engenharia Química na Área de
Desenvolvimento de Produtos e Processos) - Escola de
Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2024

1. Efluentes de biodiesel. 2. Adsorção. 3.
Material carbonoso. 4. Mesocarpo de coco. 5.
Tratamento de efluentes. I. Título. II. da Silva,
Maria Lúcia Caetano Pinto, orient.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde, oportunidades e aprendizados.

Aos meus pais, Marcos e Rejane, por jamais medirem esforços pela minha educação, me ajudando das mais diversas formas, me apoiando, incentivando e acreditando no meu potencial.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro à bolsa de mestrado.

À Profa. Dra. Maria Lúcia Caetano Pinto da Silva, pela orientação, dedicação e por ter me ensinado tanto ao longo desse estudo.

Ao prof. Dr. Hélcio José Izário Filho e o técnico Gabriel Caracciolo Koenigkam de Oliveira pela atenção, disponibilidade e auxílio nas análises ambientais realizadas no Laboratório de Absorção Atômica.

À profa. Dra. Liana Alvares Rodrigues pelas análises de infravermelho e DRX, assim como, pelo auxílio prestado durante o desenvolvimento do trabalho no Laboratório de Novos Materiais.

Ao prof. Dr. Robson da Silva Rocha pela disponibilização dos equipamentos do Laboratório de Meio Ambiente.

Aos professores Dra. Jayne Barbosa, Dr. Clodoaldo Saron, Dra. Ana Karine Furtado de Carvalho e Dra. Carla Cristina Almeida Loures pelo tempo e atenção disponibilizados e pelas correções sugeridas.

Aos colegas de laboratório pela convivência, parceria e ajuda prestada durante este período.

À Universidade de São Paulo, à Escola de Engenharia de Lorena e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química pelo apoio e infraestrutura e pela oportunidade de realização deste curso.

Aos funcionários da EEL, em especial à Ana Beatriz, pela atenção e auxílio nas questões burocráticas.

A todos os amigos e familiares que direta ou indiretamente contribuíram para realização e conclusão deste trabalho.

RESUMO

ÁVILA, M. **Preparação e caracterização de material carbonoso proveniente do mesocarpo de coco verde e sua utilização como adsorvente para tratamento de efluentes de biodiesel.** 2024. 108 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2024.

O biodiesel tem ganhado cada vez mais destaque como alternativa para a substituição do diesel devido à alta demanda energética e a maior conscientização dos impactos ambientais provocados pela utilização de combustíveis fósseis. Logo após sua produção, o biodiesel normalmente é submetido a uma etapa de purificação que envolve uma lavagem para remover impurezas presentes, gerando um efluente líquido. Diversas vias de tratamento podem ser utilizadas para reduzir as concentrações de contaminantes e adequar o efluente aos padrões de lançamento estabelecidos por legislações ambientais. Considerando a capacidade de adsorção, a alta disponibilidade e o baixo custo dos resíduos agrícolas, o presente estudo visou a produção, caracterização e posterior utilização de material carbonoso (MC) proveniente do mesocarpo do coco verde como adsorvente para o tratamento da água de lavagem do biodiesel. Vale salientar que na literatura atual não são encontrados trabalhos envolvendo a síntese de um material carbonoso de coco verde para aplicação como adsorvente, juntamente com o objetivo de remover contaminantes de efluentes de lavagem de biodiesel. Para caracterizar e verificar a presença de grupos funcionais capazes de favorecer o processo de adsorção das impurezas, foram realizadas análises TG/DTG, DRX e FTIR das fibras do mesocarpo do coco verde *in natura* e do material carbonoso produzido por calcinação a 300°C e 500°C em diferentes tempos (1, 3 e 5 horas). O efluente de lavagem de biodiesel coletado para o estudo foi gerado a partir de um processo de transesterificação de óleo de cozinha residual com etanol, utilizando KOH como catalisador. Análises realizadas no efluente mostraram que diversos valores de parâmetros ambientais se encontravam inadequados, indicando excesso de poluentes e necessidade de tratamento. Foi constatada grande quantidade de matéria orgânica saponificada no efluente, demandando um pré-tratamento, que foi realizado por acidificação e filtração. Após a obtenção do efluente pré-tratado, foram realizados experimentos de adsorção com as amostras de MC e as análises de DQO das amostras tratadas indicaram altos teores de matéria orgânica mesmo após a adsorção. A amostra MC5001H apresentou maior eficiência de redução do parâmetro DQO.

Palavras-chave: Efluentes de biodiesel. Adsorção. Material carbonoso. Mesocarpo de coco. Tratamento de efluentes.

ABSTRACT

ÁVILA, M. Preparation and characterization of carbonaceous material from green coconut mesocarp and its application as an adsorbent for biodiesel wastewater treatment. 2024. 108 p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2024.

Biodiesel has been increasingly highlighted as an alternative to replace diesel due to high energy demand and greater awareness of the environmental impacts caused by the use of fossil fuels. Immediately after its production, biodiesel is typically subjected to a purification step involving washing to remove present impurities, generating a liquid effluent. Various treatment methods can be used to reduce contaminant concentrations and adapt the effluent to discharge standards established by environmental legislation. Considering the adsorption capacity, high availability, and low cost of agricultural residues, this study aimed to produce, characterize, and subsequently utilize carbonaceous material (CM) derived from green coconut mesocarp as an adsorbent for treating biodiesel wastewater. It is worth noting that current literature lacks studies involving the synthesis of green coconut carbonaceous material for use as an adsorbent, along with the objective of removing contaminants from biodiesel wastewaters. To characterize and verify the presence of functional groups capable of favoring the adsorption process of impurities, TG/DTG, XRD, and FTIR analyses were performed on in natura green coconut mesocarp fibers and carbonaceous material produced by calcination at 300°C and 500°C for different times (1, 3, and 5 hours). The biodiesel wastewater collected for the study was generated from a residual cooking oil transesterification process with ethanol, using KOH as a catalyst. Analyses performed on the effluent showed that several environmental parameter values were inadequate, indicating an excess of pollutants and the need for treatment. A significant amount of saponified organic matter was found in the effluent, requiring pre-treatment, which was performed by acidification and filtration. After obtaining the pre-treated effluent, adsorption experiments were conducted with CM samples, and COD analyses of the treated samples indicated high organic matter content even after adsorption. The sample CM5001H showed higher efficiency in reducing the COD parameter.

Keywords: Biodiesel wastewater. Adsorption. Carbonaceous material. Coconut mesocarp. Effluent treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reação de transesterificação a partir de um triglicerídeo	23
Figura 2 - Divisão do coco a partir de um corte longitudinal	32
Figura 3 - Fluxograma demonstrativo das etapas da metodologia do estudo	43
Figura 4 - Fibras de coco	44
Figura 5 - Fibras de coco trituradas em peneira de 30 mesh	44
Figura 6 - Cartucho de terra de diatomácea para análise de OG	50
Figura 7 - Sistema de extração Soxhlet para análise de OG	50
Figura 8 - Curvas TG/DTG de FC em atmosfera de N ₂	57
Figura 9 - Difratoograma de raios X da amostra FC	58
Figura 10 - Espectros FTIR da amostra FC	59
Figura 11 - Amostras calcinadas em 1h, 3h e 5h em temperaturas de 300°C e 500°C	60
Figura 12 - Difratoogramas de raios X das amostras FC e MC	61
Figura 13 - Espectros FTIR para as amostras FC e MC	63
Figura 14 - Curvas TG/DTG de MC3001H em atmosfera de N ₂	64
Figura 15 - Curvas TG/DTG de MC3003H em atmosfera de N ₂	65
Figura 16 - Curvas TG/DTG de MC3005H em atmosfera de N ₂	65
Figura 17 - Curvas TG/DTG de MC5001H em atmosfera de N ₂	67
Figura 18 - Curvas TG/DTG de MC5003H em atmosfera de N ₂	67
Figura 19 - Curvas TG/DTG de MC5005H em atmosfera de N ₂	68
Figura 20 - Separação de óleo em E0 após acidificação	72
Figura 21 - Espuma formada em E0 após a mistura em liquidificador	73
Figura 22 - Filtrados obtidos após adsorção em concentração 1%	77
Figura 23 - Curva do pH em função do tempo de agitação	78
Figura 24 - Filtrados obtidos após adsorção em concentração 5%	79
Figura 25 - Curva do pH em função do tempo de agitação	80
Figura 26 - Separação do óleo da amostra E0 após acidificação	82
Figura 27 - Amostra E1 e óleo após separação	82
Figura 28 - Óleo residual presente na superfície da amostra E1 após a etapa 1 do pré- tratamento	83
Figura 29 - Amostra E2 obtida após filtração	84
Figura 30 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Concentração x pH"	88

Figura 31 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Tempo de agitação"	90
Figura 32 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Material Carbonoso"	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Distribuição dos experimentos de adsorção para estudo das variáveis concentração e pH utilizando MC3001H.....	54
Quadro 2 - Distribuição dos experimentos de adsorção para estudo da variável Tempo utilizando MC3001H	55
Quadro 3 - Distribuição dos experimentos de adsorção para o estudo dos MC	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial de coco no ano de 2019 e projeções de 2020 e 2021.....	30
Tabela 2 - Composição química das fibras da casca do coco	36
Tabela 3 - Composição inorgânica das fibras do mesocarpo do coco verde e dos produtos pós explosão a vapor	37
Tabela 4 - Porcentagens de composição das cinzas da casca de coco obtidas a 500°C, 600°C e 700°C	39
Tabela 5 - Esquema de identificação das amostras calcinadas	46
Tabela 6 - Limites de parâmetros físico-químicos para descarte em corpos d'água classe 3	47
Tabela 7 - Experimentos de adsorção em E0	52
Tabela 8 - Condições estabelecidas para os experimentos de adsorção (estudo dos MC)...	56
Tabela 9 - Resultados das curvas TG/DTG para as amostras FC e MC	69
Tabela 10 – Resultados dos parâmetros do efluente E0 comparados aos limites de descarte	75
Tabela 11 - Tempos de agitação dos experimentos de adsorção em E0	77
Tabela 12 - Experimentos de adsorção em E0 (MC3001H 1%).....	78
Tabela 13 - Experimentos de adsorção em E0 (MC5001H 5%).....	80
Tabela 14 - Resultados dos parâmetros das amostras de efluente bruto (E0) e pré-tratadas (E1 e E2) comparados aos limites de descarte	85
Tabela 15 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção “Concentração x pH”	88
Tabela 16 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Tempo de agitação"	89
Tabela 17 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Material Carbonoso"	91

LISTA DE SIGLAS

AgHSO ₄	sulfato ácido de prata
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CH ₄	gás metano
CO ₂	dióxido de carbono
Cl ₂	dicloro
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	demanda bioquímica de oxigênio
DQO	demanda química de oxigênio
DRX	difratometria de raios X
DTG	derivative thermogravimetry (termogravimetria derivativa)
E0	efluente de lavagem de biodiesel bruto
E1	efluente de lavagem de biodiesel após etapa 1 do pré-tratamento
E2	efluente de lavagem de biodiesel após etapa 2 do pré-tratamento
EEL	escola de engenharia de Lorena
Fe ₂ O ₃	óxido de ferro III
FC	fibras do coco <i>in natura</i>
FTIR	espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier
HCl	ácido clorídrico
H ₂ SO ₄	ácido sulfúrico
Hg ₂ SO ₄	sulfato de mercúrio
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
KI	iodeto de potássio
KO ₂	superóxido de potássio
KOH	hidróxido de potássio
K ₂ Cr ₂ O ₇	dicromato de potássio
LabMat	laboratório de caracterização de materiais
LOQ	departamento de engenharia química
MC	material carbonoso das fibras do coco
MC3001H	material carbonoso calcinado a 300°C por 1 hora
MC3003H	material carbonoso calcinado a 300°C por 3 horas
MC3005H	material carbonoso calcinado a 300°C por 5 horas
MC5001H	material carbonoso calcinado a 500°C por 1 hora

MC5003H	material carbonoso calcinado a 500°C por 3 horas
MC5005H	material carbonoso calcinado a 500°C por 5 horas
MnO	óxido de manganês II
MnSO ₄	sulfato manganoso
MnSO ₄ .H ₂ O	sulfato manganoso hidratado
NaHCO ₃	bicarbonato de sódio
NaN ₃	azida de sódio
NaS ₂ O ₃	tiosulfato de sódio
NaS ₂ O ₃ .5H ₂ O	tiosulfato de sódio pentahidratado
OD	oxigênio dissolvido
OG	óleos e graxas
PCl ₃	tricloreto de fósforo
P ₂ O ₃	trióxido de difósforo
P ₂ O ₄	tetróxido de difósforo
P ₂ O ₅	pentóxido de difósforo
P ₄ O ₇	heptóxido de tetrafósforo
P ₄ O ₉	nanóxido de tetrafósforo
SO ₃	trióxido de enxofre
SiO ₂	dióxido de silício / sílica
TG	thermogravimetry (termogravimetria)
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa.....	19
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Objetivo geral.....	20
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	Biodiesel.....	21
2.1.1	Produção de biodiesel.....	22
2.1.2	Água de lavagem de biodiesel.....	23
2.2	Tratamento de efluentes líquidos	24
2.3	Processo de adsorção.....	26
2.4	Resíduos agrícolas.....	27
2.4.1	Composição dos resíduos agrícolas.....	28
2.4.2	Resíduos agrícolas como adsorventes	28
2.5	O coco	29
2.5.1	Constituição do fruto.....	31
2.5.2	Resíduos de coco verde	33
2.5.3	Composição das fibras do coco	35
2.5.4	Uso da casca de coco em processos de adsorção	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Materiais.....	40
3.2	Equipamentos	40
3.3	Soluções	41
3.3.1	Sulfato manganoso	41
3.3.2	Azida-iodeto	41
3.3.3	Iodeto de potássio.....	41

3.3.4	Bicarbonato de sódio	41
3.3.5	Dicromato de potássio	41
3.3.6	Goma de amido.....	42
3.3.7	Tiosulfato de sódio.....	42
3.3.8	Sulfato ácido de prata	42
3.4	Metodologia.....	42
3.4.1	Preparação das fibras do coco	43
3.4.2	Caracterização das fibras do coco	45
3.4.2.1	Análises termogravimétricas	45
3.4.2.2	Difratometria de raios X.....	45
3.4.2.3	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier	45
3.4.3	Calcinação das FC para obtenção do material carbonoso	45
3.4.4	Caracterização dos MC.....	46
3.4.5	Caracterização do efluente de biodiesel	46
3.4.5.1	Análises quantitativas	46
3.4.5.1.1	Temperatura, pH e condutividade	48
3.4.5.1.2	Turbidez.....	48
3.4.5.1.3	Cor.....	48
3.4.5.1.4	Oxigênio dissolvido.....	48
3.4.5.1.5	Óleos e graxas.....	49
3.4.5.1.6	Demanda química de oxigênio	51
3.4.5.2	Análises qualitativas	51
3.4.6	Pré-tratamento do efluente E0	52
3.4.6.1	Acidificação e separação	53
3.4.6.2	Filtração simples.....	53
3.4.7	Caracterização das etapas de pré-tratamento.....	53
3.4.8	Ensaio de adsorção e caracterização	53

3.4.8.1	Concentração x pH	54
3.4.8.2	Tempo.....	55
3.4.8.3	Material carbonoso	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1	Caracterização das fibras do coco	57
4.1.1	Análises termogravimétricas	57
4.1.2	Difratometria de raios X.....	58
4.1.3	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier.....	59
4.2	Calcinação de FC para obtenção de material carbonoso.....	60
4.3	Caracterização do material carbonoso.....	60
4.3.1	Difratometria de raios X.....	61
4.3.2	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier.....	62
4.3.3	Análises termogravimétricas	64
4.4	Caracterização do efluente do biodiesel.....	70
4.4.1	Análises quantitativas.....	70
4.4.1.1	Turbidez	70
4.4.1.2	Cor.....	70
4.4.1.3	Oxigênio dissolvido.....	71
4.4.1.4	Óleos e graxas	72
4.4.1.5	Demanda química de oxigênio	74
4.4.2	Aplicação dos MC no efluente E0.....	76
4.4.2.1	Concentração 1%.....	76
4.4.2.2	Concentração 5%.....	79
4.5	Pré-tratamento do efluente E0.....	81
4.5.1	Etapa 1 (Acidificação e Separação)	81
4.5.2	Etapa 2 (Filtração Simples)	83
4.6	Caracterização das etapas de pré-tratamento	84

4.7	Ensaio de adsorção e caracterização	87
4.7.1	Concentração x pH	87
4.7.2	Tempo de agitação.....	89
4.7.3	Adsorção com MC.....	90
5	CONCLUSÕES.....	93
	REFERÊNCIAS.....	94

1 Introdução

Devido às limitações de oferta energética e à maior compreensão dos efeitos adversos associados ao uso dos combustíveis fósseis convencionais, o interesse por fontes de energias alternativas renováveis e menos prejudiciais ao meio ambiente vem aumentando nos últimos anos (DARWIN *et al.*, 2023; GARG; SABOUNI; AHMADIPOUR, 2023). Neste cenário, encontra-se o biodiesel, um biocombustível proveniente de fontes renováveis com caráter sustentável devido a características como biodegradabilidade e reduzida capacidade de emitir gases poluentes (OYEKUNLE *et al.*, 2023).

Durante seu processo de produção, o biodiesel normalmente é submetido a uma etapa de purificação via lavagem úmida, que consiste basicamente no uso de água com a finalidade de remover resíduos e impurezas presentes (CATARINO *et al.*, 2020; KdLdÇARSLAN; ARGUN, 2023). Após essa etapa, um efluente líquido é gerado, e com isso, surge a necessidade de tratamento prévio antes do seu descarte para o corpo d'água (TORRES *et al.*, 2021).

Desta forma, são utilizadas como referência as resoluções nacionais vigentes n°357 e n°430 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), que dispõem sobre os padrões de lançamento de efluentes líquidos em corpos hídricos.

A utilização de materiais adsorventes para remoção de espécies contaminantes encontra-se entre os métodos mais eficientes empregados para tratamento de efluentes líquidos (BUSHRA *et al.*, 2021). No entanto, algumas desvantagens associadas aos adsorventes convencionais para essa finalidade acarretam a busca por materiais que apresentem características mais sustentáveis (MILITAO *et al.*, 2021; MPATANI *et al.*, 2021).

Diante disso, entre os tipos de biomassa passíveis de reaproveitamento para o uso como biossorventes, os resíduos agrícolas podem ser destacados, uma vez que possuem baixo custo, alta disponibilidade e baixo risco potencial ao meio ambiente (MPATANI *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2019).

A fibra de coco, resíduo agrícola gerado em grandes quantidades, é um dos materiais lignocelulósicos que vem sendo bastante explorado por pesquisadores. É possível encontrar na literatura vários estudos que verificaram o potencial adsorvente dessa biomassa para remoção de diferentes contaminantes (AKTAR; SHAKIL; TUJ-ZOHRA, 2023; BISPO *et*

al., 2018; CHWASTOWSKI *et al.*, 2017; GHOSH *et al.*, 2021; LUIS-ZARATE *et al.*, 2018; STAROŃ; CHWASTOWSKI; BANACH, 2017).

Além disso, também são encontrados na literatura diversos artigos envolvendo adsorventes como biocarvão e carvão ativado, produzidos a partir de fibras do coco. Para isso, são realizados tratamentos térmicos nas fibras naturais, que podem ser associados a tratamentos químicos a depender do tipo de substância que se deseja remover (WU; ZHANG; SI, 2022; YANG *et al.*, 2022).

De acordo com dados da FAOSTAT (2019), historicamente, o Brasil se encontra entre os dez maiores produtores de coco do mundo. No ano de 2021, foram produzidas em média 2,46 milhões de toneladas de coco e o país passou a ocupar a quarta posição do ranking de produtores (ARAÚJO *et. al.*, 2023). Por esse motivo, torna-se interessante a possibilidade de aproveitamento dessa biomassa vegetal, que normalmente é descartada como resíduo.

É dentro desse contexto que, este trabalho teve como objetivo produzir material carbonoso a partir do mesocarpo de coco verde, caracterizá-lo por meio de técnicas analíticas e testar sua aplicação como adsorvente no tratamento de efluentes da indústria do biodiesel.

Aplicações utilizando fibras de coco encontradas na literatura não abordam seu uso como adsorvente na purificação da água de lavagem proveniente do processo de produção do biodiesel. Assim, buscou-se uma solução de reaproveitamento de materiais que normalmente são descartados de forma inadequada, gerando uma alternativa com viés ambiental por ajudar no controle de desperdício de resíduos agrícolas, e conseqüente redução da poluição ambiental.

Também pode ser visto como um biomaterial a ser utilizado com um olhar tecnológico, que até então está sendo descartado, possibilitando a comercialização de um novo produto com maior valor agregado, sem desperdício e com meio ambiente sustentável.

Portanto, com um perfil tecnológico sustentável, este projeto de pesquisa visou o tratamento de efluentes da produção de biodiesel utilizando para isso, um material proveniente de resíduos agrícolas.

1.1 Justificativa

A presente pesquisa se justifica devido à importância de se avaliar uma alternativa de tratamento para o efluente líquido gerado na indústria de biodiesel, por meio do estudo da capacidade de adsorção do material carbonoso das fibras de coco, buscando conferir uma reutilização para o material que ainda hoje é descartado inadequadamente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do projeto envolveu a produção e caracterização de material carbonoso a partir das fibras de coco verde em diferentes condições de queima visando a sua utilização como material adsorvente para o tratamento do efluente gerado na indústria de biodiesel.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos visados no projeto teve-se:

- a) Coleta, preparação e secagem do mesocarpo do coco verde;
- b) Separação, desfibramento e moagem das fibras de coco *in natura* (FC);
- c) Caracterização das FC e estudo das melhores condições para calcinação e produção do material carbonoso (MC);
- d) Caracterização dos MC por meio de técnicas de difratometria de raios X (DRX), termogravimetria e termogravimetria derivativa (TG/DTG) e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR);
- e) Caracterização do efluente bruto (E0);
- f) Aplicação das amostras de MC como adsorvente para efluentes de biodiesel (água de lavagem);
- g) Caracterização do efluente após adsorção por meio de análises de demanda química de oxigênio (DQO).

2 Revisão da Literatura

2.1 Biodiesel

Por cerca de meio século, o motor a diesel vem sendo utilizado em diversas aplicações, principalmente as que envolvem veículos de cargas pesadas. A princípio, o interesse por esse combustível deu-se ao fato da possibilidade de utilização de um produto antes considerado resíduo proveniente do processo de refino da gasolina, no entanto, com o conhecimento de outras características atrativas, o diesel passou a ser aplicado em situações mais exigentes (KNOTHE, 2010).

Com o aumento do custo do petróleo associado ao maior conhecimento a respeito de problemas ambientais relacionados ao uso do diesel, o biodiesel passou a ser reconhecido entre os biocombustíveis como a melhor alternativa para sua substituição do diesel proveniente do petróleo. A partir desse ponto de vista, o biodiesel torna-se mais atrativo quando comparado ao diesel de petróleo, por possuir matéria-prima renovável, ser biodegradável, possuir melhores propriedades de lubrificação, baixo teor de enxofre e menor emissão de poluentes e gases de efeito estufa (GEE) (KNOTHE, 2010; LAWAN *et al.*, 2019; QADEER *et al.*, 2021; SYAFIYUDDIN *et al.*, 2020; ZHENG *et al.*, 2023).

Desta forma, nos últimos anos o biodiesel tornou-se um biocombustível de maior acesso, sendo hoje, bastante utilizado em diversos países do mundo devido a políticas de incentivo como criação de subsídios e isenções fiscais (MOFIJUR *et al.* 2021).

A lei nº 11.097 de 13 de janeiro de 2005 que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, traz como definição de biodiesel: “Biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores à combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”.

Entre os anos de 2005 e 2015, o biodiesel que inicialmente representava apenas 10% do total de biocombustíveis produzidos no mundo, alcançou a marca de 25%. Neste período, sua produção mundial cresceu cerca de 700% e estima-se que esse valor triplique até o ano de 2025 (CHONG *et al.*, 2021; NAYLOR; HIGGINS, 2018).

O Brasil, precursor na produção e consumo dos biocombustíveis, encontra-se atualmente em um cenário bastante positivo se tratando de iniciativas envolvendo produção e consumo do biodiesel. De 2005 até 2019, a partir do Programa de Nacional de Produção e

Uso do Biodiesel (PNPB) foram produzidos, aproximadamente, 41 bilhões de litros do biocombustível em território nacional (IANDA; PADULA, 2020; BRASIL, 2019).

No ano de 2019, o Brasil foi responsável por 12% da produção global de biodiesel, ocupando a terceira posição no ranking mundial, atrás apenas da Indonésia e dos Estados Unidos (IANDA; PADULA, 2020; REN21, 2020).

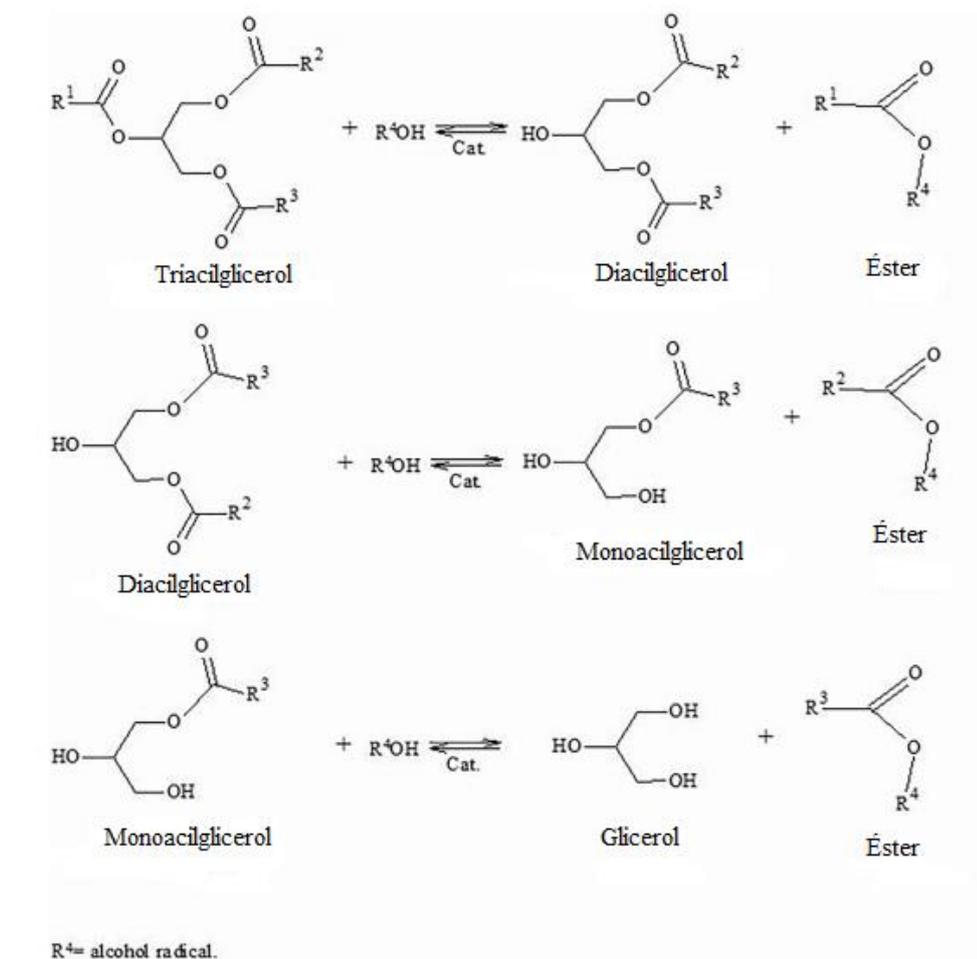
2.1.1 Produção de biodiesel

O biodiesel, um éster de longa cadeia, pode ser sintetizado a partir de gorduras animais, óleos vegetais ou até mesmo óleo de cozinha residual. Em geral, a matéria prima utilizada para produzir o biodiesel será determinada considerando as características e condições locais. A origem e a qualidade dessa matéria prima influenciarão na composição e na pureza do biodiesel obtido, podendo assim, haver a necessidade de serem realizadas reformulações no processo produtivo (AMBAT; SRIVASTAVA; SILLANPÄÄ, 2018; KNOTHE, 2010; MOFIJUR *et al.*, 2021; POORNAPUSHPAKALA *et al.*, 2021; VIDIGAL *et al.*, 2021).

O processo de produção do biodiesel consiste basicamente em uma reação de transesterificação, um conhecido método químico capaz de converter a matéria prima selecionada, que são triglicerídeos (óleos ou gorduras), em biocombustível. Na presença de um catalizador (ácido ou base fortes), o triglicerídeo irá reagir com um álcool, sendo os mais comuns o metanol e o etanol, e resultará na formação de um éster alquílico (biodiesel) e glicerol como coproduto (KNOTHE, 2010; MOFIJUR *et al.* 2021; SOUZA *et al.* 2021).

O esquema representado na Figura 1 ilustra a reação de transesterificação de um triglicerídeo para a produção do biodiesel:

Figura 1 - Reação de transesterificação a partir de um triglicerídeo



Fonte: Adaptado de Fonseca (2019).

2.1.2 Água de lavagem de biodiesel

Para que o biodiesel produzido a partir da reação de transesterificação seja reconhecido como combustível, deverá atender a padrões estabelecidos em normas internacionais (padrões americano ASTM D6751 e europeu EN 14214) e nacionais, estas, regulamentadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) SANDOUGA; AL-SHANNAG; AL-HAMAMRE, 2020; VIDIGAL, 2020).

Desta forma, após a obtenção do biodiesel, torna-se necessário submetê-lo a um processo de purificação, uma vez que o produto principal em sua forma bruta apresenta diversas impurezas como glicerol residual, ácidos graxos livres, éster, álcool, sabões, traços

de metais e catalisador (BRITO *et al.*, 2012; OKUMUS; DOGAN; TEMUR, 2019; SKOPAL, 2010).

O método de purificação convencional, mais utilizado nas indústrias de biodiesel, é a lavagem úmida, que tem como objetivo, basicamente, remover impurezas através de um processo de lavagem com água destilada ou acidificada. Apesar de ser um método bastante simples e eficiente, a lavagem úmida requer o uso de grandes volumes de água. Sendo assim, após a filtração e secagem do biodiesel, um efluente líquido (água de lavagem de biodiesel) é gerado, necessitando de tratamento antes de ser descartado às redes de esgoto (BRITO *et al.*, 2012; CATARINO *et al.*, 2020; CHOZHAVENDHAN *et al.*, 2020; TORRES *et al.*, 2021).

A legislação brasileira a partir da Resolução CONAMA nº 430/2011, estabelece que: “Art. 3º Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.”.

Além do grande volume de efluente gerado na etapa de purificação, de 20 a 130 L por cada 100 L de biodiesel, seu custo de tratamento pode variar de 0,09 a 3,8% do custo total da produção (CATARINO *et al.*, 2020; PALOMINO-ROMERO *et al.*, 2012; TORRES *et al.*, 2021).

2.2 Tratamento de efluentes líquidos

Ao longo da história das sociedades, a água tem sido um dos recursos mais essenciais para a manutenção da vida e para o desenvolvimento do homem. Por outro lado, a degradação desse recurso tão importante vem gerando uma preocupação de escala global (AZARI *et al.*, 2020).

Diversas atividades antrópicas, que efetuam descarte de contaminantes direta ou indiretamente nos corpos hídricos, são responsáveis por degradar a qualidade da água e poluir as bacias hidrográficas. Apesar das descargas domésticas serem uma significativa fonte poluidora, normalmente, afetam de forma reduzida a qualidade da água se comparadas às descargas industriais, estas geralmente lançadas em grande volume nos corpos d'água e contendo componentes altamente prejudiciais ao meio ambiente e a saúde humana (VIGIL, 2003; WANG *et al.*, 2021).

As características dos esgotos industriais variam conforme a indústria e os processos adotados. Para reduzir os valores das cargas de contaminantes presentes nesses efluentes líquidos, torna-se importante submetê-los a um tratamento antes de serem lançados aos corpos hídricos (SMARZEWSKA; MORAWSKA, 2021; VON SPERLING, 1996, p. 83).

Os processos de tratamento de efluentes podem ser classificados como físicos, químicos ou biológicos, diferindo-se de acordo com as operações unitárias utilizadas e/ou a natureza dos poluentes nos quais deseja-se remover. Os métodos químicos podem ser aplicados de forma autônoma, mas também é comum que sejam realizados seguidos de processos físicos de remoção, os quais chamamos de tratamentos físico-químicos (CHEREMISINOFF, 2001; GIORDANO, 2004).

Uma grande variedade de técnicas estão presentes entre os tratamentos físico-químicos, como precipitação química, coagulação/floculação, oxidação, adsorção por carbono ou em outros meios, troca iônica, filtração por membrana, recuperação eletrolítica, etc. (EDWARDS, 1995; RANADE; BHANDARI, 2014).

Nesse contexto, é possível verificar as possibilidades que envolvem o tratamento do efluente proveniente da lavagem do biodiesel. Estudos utilizam diferentes vias de tratamento para tal efluente, inclusive tratamentos físico-químicos (DAUD; ABDULLAH; HASAN, 2018; TORRES *et al.*, 2021).

No geral, pesquisas envolvendo tratamentos de efluentes via adsorção mostram-se bastante interessantes por utilizarem um método simples e positivo no ponto de vista ambiental. Além disso, o princípio da dessorção (processo inverso à adsorção), que confere aos materiais adsorventes, a capacidade de serem reutilizados, torna o processo mais econômico e eficiente. Diversos estudos utilizam materiais adsorventes para remover metais pesados, corantes, contaminantes orgânicos solúveis, dentre outros compostos existentes em diferentes tipos de efluentes (CHAI *et al.*, 2021; MANYANGADZE *et al.*, 2020; RUDI *et al.*, 2020).

Pitakpoolsil e Hunsom (2014) utilizaram flocos de quitosana comercial como material adsorvente para tratar um efluente de biodiesel. Foram necessárias duas repetições para remoção suficiente e o consequente enquadramento dos parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Óleos e Graxas (OG) aos limites estabelecidos em norma. No entanto, após uma reciclagem, a quitosana apresentou baixa eficiência para ser utilizada novamente.

De acordo com Han *et al.* (2021), o êxito da técnica de adsorção está diretamente associado a descoberta de materiais adsorventes apropriados. Desta forma, considerando as características gerais dos efluentes procedentes do processo de lavagem do biodiesel destacados nas literaturas utilizadas, torna-se interessante o estudo de novos materiais que possibilitem seu tratamento via adsorção.

2.3 Processo de adsorção

A adsorção é um processo de transferência de massa, que ocorre devido a capacidade de determinados sólidos (adsorventes) concentrarem em sua superfície componentes existentes em fluidos (adsorvatos), ocasionando assim, sua segregação. Diferentes tipos de adsorventes com propriedades físico-químicas variadas podem ser utilizados para remoção de diversas espécies contaminantes. Desta forma, para garantir uma boa eficiência do processo de adsorção, fatores relacionados às propriedades do adsorvente, natureza dos adsorvatos e condições da solução devem ser considerados (LI; YU, 2024; MILITAO *et al.*, 2021; MPATANI *et al.*, 2021; RUTHVEN, 1984).

Um fator muito importante para o processo de adsorção, é a superfície externa do adsorvente, local onde os componentes adsorvidos se depositam, ou seja, quanto maior for esta região de contato por unidade de massa sólida, melhor será a capacidade de adsorção do material. Por esse motivo, normalmente os materiais adsorventes apresentam poros em suas partículas (RUTHVEN, 1984).

Outros fatores relevantes para garantir a eficiência da adsorção são: temperatura, pH, concentração inicial da solução, interação adsorvato-adsorvente, solubilidade, solutos coexistentes, taxa da agitação, tempo de contato, grupos funcionais e polaridade (CHAI *et al.*, 2021; MILITAO *et al.*, 2021; NIPA *et al.* 2023).

A adsorção pode ser considerada uma das técnicas mais eficientes para o tratamento de efluentes, removendo uma grande variedade de espécies contaminantes em meio aquoso. Por esse motivo, os materiais adsorventes vêm sendo muito utilizados em tecnologias de tratamento de água e esgoto. Em geral, os tratamentos via adsorção apresentam características bastante atrativas, tais quais: design simples, facilidade de operação, alta eficiência, baixo consumo de energia e baixo custo inicial (BENJAMIN; LAWLER, 2013; BUSHRA *et al.*, 2021; HAN *et al.*, 2021; MILITAO *et al.*, 2021; NIPA *et al.* 2023). Contudo, encontrar bons adsorventes ainda vem sendo um desafio para a ciência.

Atualmente, o material adsorvente mais utilizado para tratar água e efluentes é o carvão ativado, devido às suas características favoráveis como elevada área de superfície específica e porosidade, além de boa capacidade de remoção de contaminantes. No entanto, este material pode apresentar desvantagens relativas ao seu custo e taxa de regeneração, bem como complexidade em sua produção e dificuldades de separação após o uso como purificante. Em função disso, outras possíveis formas de melhorias e redução de custos estão sendo exploradas; uma dessas alternativas tem sido a busca por materiais mais sustentáveis, como os resíduos agrícolas e florestais, os quais são passíveis de reaproveitamento (HAN *et al.*, 2021; MILITAO *et al.*, 2021; MPATANI *et al.*, 2021).

2.4 Resíduos agrícolas

Os resíduos agrícolas são restos ou subprodutos inutilizáveis das atividades do setor agrícola como sementes, cascas, folhas, polpas e caules, que representam aproximadamente 1.300 milhões de toneladas anuais (ALAN; KÖKER, 2023; LOU *et al.*, 2023).

Nos últimos anos, devido à crescente preocupação com questões ambientais, pesquisas que buscam desenvolver “tecnologias verdes” vêm se tornando cada vez mais comuns. Dentro deste contexto, é possível compreender a importância do aproveitamento dos resíduos agrícolas, uma vez que podem ser vistos como alternativas sustentáveis para produzir biomateriais e bioenergia (CHEN *et al.*, 2024; MA; ZHANG; YIN, 2021; SANTAWEE; TREESUBSUNTORN; THIRAVETYAN, 2019; WU *et al.*, 2019).

O interesse pelos resíduos agrícolas deve-se a seu baixo custo, além de elevada e imediata disponibilidade. Em países onde a agricultura é uma atividade expressiva, enormes quantidades desses resíduos são geradas, e um dos destinos mais comuns são os aterros sanitários e os lixões. Também é bastante comum a realização de queimas em campo aberto, com a geração de cinzas como subproduto, além da emissão de gases e partículas potencialmente prejudiciais ao meio ambiente (CHARITHA *et al.* 2021; FAREED *et al.*, 2020; PONCE *et al.*, 2021; WU *et al.*, 2019).

Essas práticas, além de apresentarem uma grande ameaça ao meio ambiente, culminam em um enorme desperdício de recursos. Desta forma, o aproveitamento desses materiais permite a minimização dos resíduos e a agregação de valor a eles, promovendo a sustentabilidade e a economia circular (AWOGBEMI; VON KALLON, 2023; SANTAWEE; TREESUBSUNTORN; THIRAVETYAN, 2019; ZHANG *et al.*, 2020).

2.4.1 Composição dos resíduos agrícolas

A maior parte dos resíduos agrícolas consiste em materiais lignocelulósicos, que são formados por três principais biopolímeros: celulose, hemicelulose e lignina (PONGCHAIPHOL *et al.*, 2022; RISEH *et al.*, 2024).

A celulose, um polissacarídeo de alto peso molecular, desempenha um papel crucial na manutenção da estrutura das paredes celulares das plantas. Sendo o componente estrutural principal, ela confere características como estabilidade e resistência. Por outro lado, a lignina, um polímero de estrutura amorfa formada por aromáticos e alifáticos, conecta-se à celulose e constitui a parede celular, conferindo rigidez e promovendo maior proteção contra danos. A hemicelulose, por sua vez, é um polissacarídeo composto por diversos açúcares e desempenha o papel de elemento de ligação entre a celulose e a lignina (PASSOS, 2005; RISEH *et al.*, 2024).

Os biopolímeros lignocelulósicos podem ser transformados em bioenergia, produtos químicos e diversos outros materiais. Apesar de serem encontrados estudos que relatam aplicações para lignocelulose, devido à sua complexidade estrutural, é comum que haja necessidade de pré-tratamento (CHEN *et al.*, 2021).

Segundo Periyasamy *et al.* (2024), o alto teor de carboidratos presentes nesse tipo de resíduo possibilita sua aplicação na geração de bioenergia, tratamento de efluentes industriais, produção de enzimas industriais, carvão ativado e biocombustíveis como bio-óleo e bioetanol.

2.4.2 Resíduos agrícolas como adsorventes

Diversos biossorventes oriundos de resíduos agrícolas e florestais vêm ganhando destaque em pesquisas, sendo explorados como adsorventes não convencionais. Grandes exemplos de biossorventes são o carvão ativado e o biocarvão, que são materiais carbonosos com elevada porosidade e outras propriedades que proporcionam a adsorção de contaminantes (CHONG; SOH; YONG, 2023).

Para preparação desses materiais adsorventes são empregadas técnicas que possibilitam elevar o rendimento e preservar os grupos funcionais mais abundantes. O biocarvão é produzido via tratamento térmico (pirólise) em temperaturas inferiores a 700°C e condições restritas de oxigênio, enquanto o carvão ativado envolve queimas que podem alcançar 2000°C (CHONG; SOH; YONG, 2023; NGO *et al.* 2023).

Além dos biocarvões e dos carvões ativados alguns estudos utilizam cinzas de resíduos agrícolas e florestais para diferentes finalidades e aplicações. Para obtê-las, o material natural é submetido a queima controlada (aquecimento até 900°C), degradando a matéria orgânica presente. Durante esse processo, a sílica amorfa constituinte da biomassa vegetal (sílica biogênica) é convertida à dióxido de silício (SiO₂) que é uma sílica altamente reativa. Desta forma, as cinzas de resíduos vegetais se tornam uma opção sustentável para substituir as sílicas amorfas sintéticas, que são muito populares devido a sua eficiência em processos de adsorção, sendo comumente aplicadas em processos de separação de substâncias como tratamento de águas e efluentes líquidos (GOMES; FURTADO; SOUZA, 2018; THOMAS *et al.*, 2021).

Thomas *et al.* (2021) realizaram um levantamento de características e aplicabilidade em cimento Portland comum (OPC) e concreto geopolimérico de cinzas de diferentes tipos de biomassa (folhas de bambu e bananeira, cascas de banana, capim elefante, fibras de tamareira, palha de arroz e de trigo, resíduos de azeitona e sabugo de milho). De acordo com este estudo, com exceção da cinza dos resíduos de azeitona, a qual o K₂O se mostrou como o maior componente inorgânico em porcentagem (entre 26,67% e 42,66%), a sílica foi detectada como componente principal em todas as outras cinzas estudadas, variando em uma faixa de concentrações entre 35,93% e 86,5%.

Além disso, propriedades físicas que influenciam o processo de adsorção, como área superficial específica, distribuição de tamanho de partículas, densidade aparente etc., podem variar entre os tipos de cinzas, uma vez que estão relacionadas com as condições de processamento e o tipo de biomassa utilizada (CHARITHA *et al.*, 2021).

2.5 O coco

Cocos nucifera L., ou simplesmente coqueiro como é popularmente conhecido, é uma espécie do gênero *Cocos*, pertencente à família *Arecaceae* ou *Palmae* (família das palmeiras). Cultivado em regiões de clima tropical e subtropical por cerca de 90 países, o coqueiro possui um grande destaque econômico, uma vez que é possível obter aproveitamento de seus frutos e subprodutos. O processo de amadurecimento dos frutos dura aproximadamente um ano e a produção anual varia entre 50 e 100 unidades por árvore cultivada (BANERJEE, 2020; MISHRA; BASU, 2020; SEBRAE, 2016; SIQUEIRA; ARAGÃO; TUPINAMBÁ, 2002).

A primeira introdução de coqueiros em território brasileiro ocorreu no ano de 1553, pelo Estado da Bahia, motivo pelo qual seu fruto também é conhecido como “coco-da-baía” (MARTINS; JESUS JUNIOR, 2014; SIQUEIRA; ARAGÃO; TUPINAMBÁ, 2002).

De acordo com informações da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (2019), são produzidos aproximadamente 60 milhões de toneladas de coco por ano no mundo e entre os principais produtores estão a Indonésia, Filipinas e Índia, que juntos dispõem de mais de 70% da área cultivada e da produção mundial.

Atualmente, o Brasil encontra-se entre os maiores produtores, com cerca de 1,6% da área colhida e 3,7% da produção em relação ao total mundial, no entanto, é o país que apresenta a maior taxa de produtividade se compararmos aos principais produtores (BRAINER, 2018).

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre os valores relativos à produção de coco em 2019 e projeções para os anos de 2020 e 2021, relacionando os cinco principais países produtores e o total mundial.

Tabela 1 - Produção mundial de coco no ano de 2019 e projeções de 2020 e 2021

Países	Produção (mil t)			Área colhida (mil ha)			Rendimento (kg/ha)		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
Indonésia	17129	16882	16812	2.800	2812	2778	6117	6003	6052
Filipinas	14.765	14.420	14.357	3.652	3.595	3.610	4.043	4.011	3.977
Índia	14.682	12.963	13.314	2.151	2.100	2.102	6.826	6.173	6.333
Sri Lanka	2.469	2.276	2.242	503	463	463	4.904	4.913	4.843
Brasil	2.349	2.459	2.447	187	187	194	12.540	13.114	12.588
Total Mundial	62.893	60.301	60.518	11.847	11.631	11.637	5.309	5.184	5.201

Fonte: FAOSTAT (2021), adaptado de Brainer (2021).

A região Nordeste brasileira, em especial o seu litoral, dispõe da maior área destinada ao cultivo de coqueiros do país, devido a condições características que favorecem o desenvolvimento desta cultura, como o tipo de solo, balanço de radiação solar, umidade relativa entre outras. Apesar disso, nas últimas décadas, novas áreas de cultivo vêm surgindo em regiões onde esse tipo de cultura não se mostrava de maneira expressiva, como as regiões Sudeste, Centro Oeste e Norte. Os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, destacam-se quanto a produtividade por apresentarem maiores rendimentos, além disso, podem ser interessantes produtores do fruto ainda fresco, uma vez que se encontram próximos a importantes centros de consumo (ARAGÃO; ISBERNER; CRUZ, 2001; MARTINS; JESUS JUNIOR, 2014; SANTOS *et al.*, 2020).

A divisão da produção brasileira de coco pode ser destacada em dois principais segmentos: o fruto seco, direcionado à indústria e o fruto verde, direcionado ao mercado de água de coco (MARAFFON *et al.*, 2019).

Segundo informações do Sebrae (2016), a água de coco possui um grande destaque no atual cenário nacional devido às suas propriedades isotônicas, e por esse motivo, seu consumo vem apresentando um significativo crescimento no país.

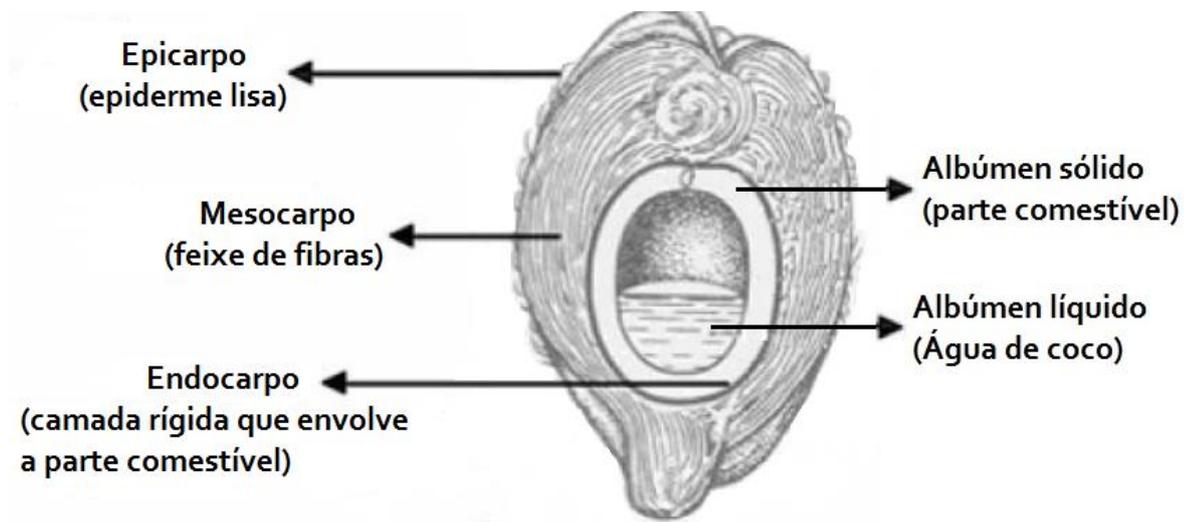
2.5.1 Constituição do fruto

No geral, o fruto de um coqueiro pode pesar de 1 a 2kg e sua constituição pode ser entendida a partir da seguinte divisão: em sua região externa, encontra-se uma casca, constituída por duas frações, denominadas epicarpo e mesocarpo, e no interior do fruto, encontra-se o endocarpo formando uma estrutura denominada “noz”, a qual abriga a parte comestível do fruto (KUMAR *et al.*, 2021; MARAFON *et al.*, 2019; MISHRA; BASU, 2020).

Epicarpo é o nome designado para a fina camada externa que envolve o fruto; mesocarpo, para a fração situada logo abaixo, formada por cerca de 70% de fibras e 30% de pó; e por fim, envolvendo a parte comestível do fruto, encontra-se o endocarpo, fração bastante rígida de função protetora. No geral, o fruto seco apresenta em seu interior o endosperma, polpa ou albúmen sólido, que pode ser consumido in natura, seco ou fermentado. Já o fruto verde contém, predominantemente, endosperma ou albúmen líquido, mais comumente conhecido como “água de coco” (BRAINER, 2018; MARAFON *et al.*, 2019).

A Figura 2 representa um esquema da caracterização de um coco visto através de um corte longitudinal.

Figura 2 - Divisão do coco a partir de um corte longitudinal



Fonte: Ferreira¹ *et al.* (1998) apud Andrade *et al.* (2004).

¹ FERREIRA *et al.* A cultura do coqueiro no Brasil. 2. ed. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1998. p. 292.

2.5.2 Resíduos de coco verde

O crescimento na demanda de produtos como água e polpa de coco provocou um salto produtivo, e conseqüentemente, um significativo aumento na geração de resíduos do fruto. O mau gerenciamento desses resíduos é capaz de gerar impactos negativos, tanto na esfera ambiental, como nas esferas econômicas e sociais (NUNES *et al.*, 2020).

Nas culturas de coco seco, o albúmen sólido (parcela comestível) destaca-se como produto de interesse, o que leva à separação e descarte dos resíduos (parcela não comestível) nos próprios locais de cultivo. Desta forma, os resíduos do fruto maduro (região fibrosa) podem ser submetidos a um processamento, no qual são convertidos em fibras e uma significativa parcela de pó, servindo como substrato para plantio (MARTINS; JESUS JUNIOR, 2014; ROSA *et al.*, 2001).

No entanto, devido à crescente demanda de água de coco, outras culturas voltaram-se à obtenção do fruto verde para zonas de comercialização desse produto, que ocorre especialmente em regiões litorâneas e outros grandes centros consumidores. Nesse cenário, é bastante comum o consumo do produto ainda no interior do próprio fruto, este que logo se tornará um resíduo (ARAGÃO; ISBERNER; CRUZ, 2001; MARTINS; JESUS JUNIOR, 2014).

De acordo com Nunes *et al.* (2020), o consumo da água de coco comercializada no interior do próprio fruto acarreta uma grande dificuldade de obter-se informações precisas acerca da quantidade de resíduos de coco verde gerados, prejudicando assim a quantificação e o gerenciamento desses resíduos em um espaço definido.

A comercialização da água de coco no interior do fruto verde, contudo, pode ser afetada devido a problemas de armazenamento, perecibilidade e transporte. Além da aparência dos frutos ser prejudicada, também é possível perceber a alteração na coloração da água devido ao contato com os resíduos da casca após determinado período. Desta forma, para suprir a alta demanda e evitar que isso ocorra, torna-se conveniente a realização de processos de extração e envasamento da água (SEBRAE, 2016).

Sendo assim, torna-se evidente a obtenção de grandes volumes de cascas e fibras no cenário produtivo do coco verde. Segundo Corradini *et al.* (2009), essa fração não comestível representa aproximadamente 85% do peso bruto do fruto e por esse motivo são geradas quantidades significativas de resíduos.

O principal problema está associado ao fato de que a alta umidade presente no fruto ainda verde (aproximadamente 85%) e características pouco favoráveis das fibras em relação ao fruto maduro, limitam consideravelmente aplicações para esses resíduos. Por esse motivo, as cascas normalmente são descartadas (ROSA *et al.*, 2001).

Visto que a produção de frutos voltados para o abastecimento do mercado brasileiro de água de coco é bastante expressiva, ocorrerá uma alta geração de resíduos com baixa possibilidade reaproveitamento.

Apesar de ser um material orgânico, esse tipo de resíduo pode levar em média, de 8 a 10 anos para sofrer total degradação, e quando concentrados em locais impróprios, normalmente devido ao recolhimento e disposição irregulares, podem acarretar problemas ambientais e de saúde pública (MARAFON *et al.*, 2019; CHAGAS NETO *et al.*, 2010; NUNES *et al.*, 2020).

Além de favorecerem a sobrecarga de aterros sanitários, esses resíduos são, muitas vezes, depositados em lixões e até mesmo em margens de estrada, praias ou lotes, aumentando ainda mais a poluição física e visual dos locais públicos. Desta maneira, o acúmulo e disposição inadequada desse material passam a contribuir para a proliferação de doenças disseminadas por vetores, contaminação do solo e corpos hídricos e obstrução de redes de drenagem urbana (MARAFON *et al.*, 2019; CHAGAS NETO *et al.*, 2010; NUNES *et al.*, 2020; SEBRAE, 2016; SILVEIRA, 2008).

Outra grande questão ambiental associada aos frequentes destinos desse tipo de resíduo, refere-se ao fato da degradação das cascas do coco verde, assim como de outros tipos de matéria orgânica, produzir gases como gás metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Isso ocorre devido a condições anaeróbias existentes em ambientes como os lixões e aterros sanitários. Esses gases, além de serem altamente prejudiciais ao meio ambiente, podem ser responsáveis pela redução da vida útil dos aterros (PASSOS, 2005; SILVEIRA, 2008).

À vista desse problema cada vez mais comum, torna-se de suma importância o aproveitamento dos resíduos do coco verde, não somente pelo âmbito econômico e social, mas também pelo ponto de vista ambiental.

2.5.3 Composição das fibras do coco

As fibras naturais estão presentes nas plantas e podem ser divididas conforme sua origem, por exemplo, no caso do coco, as fibras são extraídas da casca do próprio fruto. Diferentemente das fibras sintéticas, as quais é possível ter controle suas propriedades, as fibras de origem natural normalmente apresentam significativas variações (HERRERA-FRANCO; VALADEZ-GONZÁLEZ, 2021; JAMPÍLEK; KRÁĀOVÁ, 2020; KUMAR; KESAVAN, 2020).

A celulose é o componente dominante presente nas fibras naturais, uma vez que confere resistência mecânica a elas. Essas fibras também apresentam em sua composição química outros dois importantes componentes: a hemicelulose e a lignina, que somados à celulose, representam cerca de 85 - 90% da biomassa. A fração restante é constituída por extrativos orgânicos e matéria inorgânica (HERRERA-FRANCO; VALADEZ-GONZÁLEZ, 2021; PASANGULAPATI, 2012; SILVEIRA, 2008).

No caso do coco, os feixes fibrosos situam-se na fração da casca denominada “mesocarpo” e quando comparados com outros tipos de fibras naturais, apresentam maiores teores de lignina, o que atribui rigidez, dureza e durabilidade elevadas à casca. Além disso, a lignina confere características oleofílicas às fibras do coco, devido a presença de anéis aromáticos, ligações de éter β -O-4, C – O e C – C em sua estrutura molecular. Já a presença de grupos hidroxila (-OH) na holocelulose (celulose e hemicelulose), é responsável pela hidrofília dessa biomassa (CARDOSO *et al.*, 2021; CHEN *et al.*, 2016; MISHRA; BASU, 2020).

Contudo, devido à grande diversidade de ecótipos da espécie *Cocos nucifera L.*, é comum a ocorrência de significativas variações nas fibras, no que se refere aos aspectos quantitativos e qualitativos. Além disso, sabe-se que mesmo dentro da mesma variedade, podem ocorrer diferenças, como comprimento e espessura das fibras. Outro fator importante é a idade da casca, uma vez que frutos mais maduros podem apresentar, além da diferença de composição química, fibras de qualidade superior (MISHRA; BASU, 2020).

Desta forma, estudos levantados relataram variações na composição química das fibras da casca do coco. A Tabela 2 apresenta uma comparação de valores relativos aos componentes celulose, hemicelulose, lignina e cinzas, obtidos em alguns desses estudos.

Tabela 2 - Composição química das fibras da casca do coco

Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Referência
8,51 ± 1,06	35,62 ± 2,26	37,59 ± 0,67	0,97 ± 0,12	Cardoso <i>et al.</i> (2021)
24,7	12,26	40,1	2,56	Cabral <i>et al.</i> (2017)
44,20	12,10	32,2	2,20	Abdul Khalil, Siti Alwani, & Mohd Omar (2006)
43,44	0,25	45,84	2,22	Khedari <i>et al.</i> (2004)

Fonte: Autora.

Alguns estudos, como os realizados por Cabral *et al.* (2017) e Ghosh *et al.* (2021) envolvem a realização de pré-tratamentos ácidos ou alcalinos nas fibras de resíduos de casca do coco, utilizando reagentes como ácido sulfúrico, ácido fosfórico e hidróxido de sódio.

De acordo com Cardoso *et al.* (2021), as paredes das células constituintes do material lignocelulósico sofrerão ruptura quando submetidas a esses tratamentos, promovendo assim, a liberação de lignina e holocelulose. Por esse motivo, a estrutura química do material será modificada, e suas propriedades também sofrerão alterações. No entanto, além do custo associado a utilização de reagentes na etapa de pré-tratamento, também é gerado um resíduo, que pode promover efeitos negativos ao meio ambiente quando descartados de maneira inadequada.

Insemeesak e Areeprasert (2020) realizaram um estudo de explosão a vapor nas fibras do mesocarpo do coco verde. Durante o desenvolvimento dessa pesquisa, uma análise elementar foi realizada, possibilitando a caracterização da matéria-prima composta por fibras do mesocarpo do coco verde com exocarpo triturados e dos produtos desse material, obtidos após o processo de explosão a vapor. Essa análise também permitiu a identificação da

composição inorgânica da matéria-prima e dos produtos em escalas de laboratório e piloto. Os valores obtidos estão descritos pela Tabela 3.

Tabela 3 - Composição inorgânica das fibras do mesocarpo do coco verde e dos produtos pós explosão a vapor

Composição (% em peso)	Fibras do coco verde	Produto de fibra em escala de laboratório				Produto de fibra em escala piloto
		195°C	200°C	205°C	210°C	195°C
Al	0,04	0,67	0,55	0,39	0,47	0,24
Si	1,26	15,39	16,95	16,25	17,15	12,2
P	0,85	1,3	1,41	1,36	1,37	1,19
S	0,49	2,87	3,37	3,77	4,23	2,99
Cl	21,58	5,19	3,45	5,16	3,9	1,72
K	45,12	7,4	3,33	4,38	3,61	1,2
Ca	5,76	19,2	21,09	20,25	19,84	28,37
Fe	2,45	6,38	5,75	4,43	4,6	8,37

Fonte: Inseemesak e Areeprasert (2020).

A partir desses dados foi possível verificar que os teores de K e Cl, identificados como os principais componentes inorgânicos das fibras *in natura*, foram reduzidos após a lixiviação decorrente do processo de explosão a vapor. Desta forma, houve um significativo aumento nas porcentagens de Si e Ca, tornando-se assim, os componentes em destaque na composição das cinzas.

2.5.4 Uso da casca de coco em processos de adsorção

As fibras da casca do coco vêm sendo bastante utilizadas em processos de adsorção, especialmente com o objetivo de tratar águas residuais. Pesquisas realizadas por Staroń, Chwastowski e Banach (2017), Chwastowski *et al.* (2017), Luis-Zarate *et al.* (2018), Ghosh *et al.* (2021) são alguns exemplos de estudos que fazem uso desses resíduos como

biossorvente buscando a remoção de espécies químicas como íons metálicos, hidrocarbonetos dissolvidos e corantes de diversos tipos de efluentes.

A capacidade de adsorção desse tipo de fibra também pode ser associada às suas características físicas, como a grande quantidade de poros e alta resistência ao desgaste (CARDOSO *et al.*, 2021).

Por outro lado, apesar de pesquisas utilizarem resíduos de coco *in natura* como biossorventes, sabe-se que modificações químicas nos componentes desse tipo de material podem melhorar o desempenho da adsorção (ARAÚJO, *et al.* 2023).

Conforme relatado por Anuar *et al.* (2018), atualmente, a produção de carvão ativado a partir de resíduos de casca de coco tem obtido maior destaque por parte das pesquisas, devido às atrativas propriedades adsorventes deste material, o que o torna útil para o tratamento de águas residuais. Estudos recentes de Aktar, Shakil e Tuj-Zohra (2023) e Packialakshmi *et al.* (2023) produziram carvões ativados à base de casca de coco para adsorver contaminantes de efluentes de curtume e galvanoplastia, respectivamente.

Além disso, segundo Ighalo *et al.* (2023) os biocarvões produzidos com resíduos de coco também podem ser aplicados para tratamento de efluentes. Alguns estudos nesse sentido puderam ser encontrados, como o de Yang *et al.* (2022) que produziram biocarvão por co-pirólise combinando lodo de esgoto e fibras de coco para estabilizar metais pesados e adsorver ciprofloxacina e o de Baharum *et al.* (2020), que utilizaram biocarvões de fibra de coco modificados quimicamente para remover diazinon (pesticida organofosforado) de águas residuais.

Anuar *et al.* (2018) utilizaram resíduos da casca de coco para explorar a possibilidade de produção de sílica, que se destaca devido ao seu potencial adsorvente. Para isso, amostras de material foram submetidas a queimas em ambiente controlado em temperaturas pré-determinadas de 500°C, 600°C e 700°C. As análises de fluorescência de raios-X (XRF) realizadas nas cinzas da casca de coco indicaram a presença de diversos óxidos, incluindo o SiO₂, cujas porcentagens variavam em uma faixa de 8 a 11%, conforme é possível observar nos valores descritos pela Tabela 4.

Tabela 4 - Porcentagens de composição das cinzas da casca de coco obtidas a 500°C, 600°C e 700°C

Compostos	Porcentagens de composição (%)		
	500°C	600°C	700°C
SiO₂	8,09	11,65	9,24
CaO	27,93	29,71	31,10
K₂O	19,85	18,32	18,40
Al₂O₃	0,76	0,36	0,84
SO₃	3,12	2,50	2,67
Fe₂O₃	1,09	0,40	0,89
P₂O₅	0,27	0,08	0,06
Cl	37,28	36,85	36,17
Outros	1,61	0,13	0,63

Fonte: Adaptado de Anuar *et al.* (2018).

Conforme destaca Mishra e Basu (2020), diversos fatores podem influenciar na composição das fibras naturais. Desta forma, ao analisar estudos que envolvem materiais produzidos a partir de matéria prima natural, como as fibras de coco, vale ressaltar que significativas variações podem ocorrer quanto à composição dos materiais obtidos.

3 Materiais e Métodos

O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Novos Materiais, do Departamento de Engenharia Química (LOQ) da Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo (EEL/USP).

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização dos experimentos relativos a este trabalho estão listados a seguir:

- a) fibras naturais de coco;
- b) ácido clorídrico (HCl) concentrado (36% m/m) marca LS Chemicals;
- c) ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado (98% m/m) marca Synth;
- d) água deionizada;
- e) azida de sódio (NaN₃) marca Synth;
- f) hexano P.A;
- g) hidróxido de potássio (KOH) em lentilhas marca Merck;
- h) iodeto de potássio (KI) marca Synth;
- i) sulfato de mercúrio (Hg₂SO₄) marca Synth;
- j) cadinho de porcelana pequeno;
- k) caçarola de porcelana;
- l) papel filtro qualitativo;
- m) funil de Büchner 115 mm;
- n) kitassato de 500 mL;
- o) papel filtro qualitativo;
- p) frasco B.O.D (Demanda Bioquímica da Oxigênio).

3.2 Equipamentos

Para a realização das análises e experimentos, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) balança analítica (marca Shimadzu, modelo TX323L);
- b) banho maria metabólico com agitação orbital tipo Dubnoff (marca Marconi, modelo MA096);
- c) bloco digestor para DQO;
- d) bomba de vácuo (marca Thomas Compressors & Vaccum Pumps, modelo 2107VG20TFEL);
- e) difratômetro de raios X (marca PANalytical, modelo Empyrean);

- f) espectrofotômetro manual (marca Spencer Hipperquímica, modelo IL226);
- g) espectrômetro (marca Perkin Elmer, modelo Spectrum GX);
- h) extrator soxhlet (marca Tecnal, modelo TE-044-8/50);
- i) forno tipo mufla (marca Spencer Equipamentos, modelo);
- j) liquidificador;
- k) medidor de condutividade (marca Gehaka, modelo CG1800);
- l) moinho de facas (Marca Marconi, modelo MA340);
- m) pHmetro (marca Spencer scientific, modelo SP3611);
- n) termobalança (marca Shimadzu, modelo TGA-50);
- o) turbidímetro (marca Tecnopon, modelo TB-1000).

3.3 Soluções

Todas as soluções utilizadas nos experimentos deste estudo foram preparadas conforme descrito neste tópico.

3.3.1 Sulfato manganoso

Para a preparação de 1 L de solução, foram dissolvidos em água deionizada, 364g de sulfato manganoso hidratado ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

3.3.2 Azida-iodeto

Foram dissolvidos 700g de KOH e 150g de KI em 1 L de água deionizada. Em seguida, foi produzida uma solução contendo 10g de NaN_3 e 40 mL de água deionizada. Ambas as soluções foram misturadas.

3.3.3 Iodeto de potássio

Foram dissolvidos 60 g de KI em 1 L de água deionizada para preparação de solução a 6% m/v.

3.3.4 Bicarbonato de sódio

Foram dissolvidos 40 g de bicarbonato de sódio (NaHCO_3) em 1 L de água deionizada para preparação de solução a 4% m/v.

3.3.5 Dicromato de potássio

Foram pesados 4,914g de dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), colocados para secagem em estufa durante 1 hora a 103°C , e em seguida, dissolvidos em 100mL de água deionizada, de modo a obter uma solução de concentração 1,0 Eq/L.

3.3.6 Goma de amido

Inicialmente, foi separado um volume de 100 mL de água deionizada. Em aproximadamente 10 mL, adicionou-se 1 g de goma de amido, até formar uma solução branca. Em seguida, o restante da água foi aquecido até a fervura, e então, a solução de amido foi adicionada sobre ela, obtendo-se uma solução 1% m/v.

3.3.7 Tiosulfato de sódio

Foram dissolvidos 3,7g de tiosulfato de sódio pentahidratado ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) em água até a graduação de 500mL de um béquer para obtenção de solução 0,025 Eq/L. Então, transferiu-se a mesma para um frasco âmbar.

3.3.8 Sulfato ácido de prata

Foram adicionados 6,8367g de Sulfato Ácido de Prata (AgSO_4) de 98% de pureza em um frasco âmbar de 1 L de H_2SO_4 concentrado (98% m/m). Devido à dificuldade de dissolução, aguardou-se 48 h.

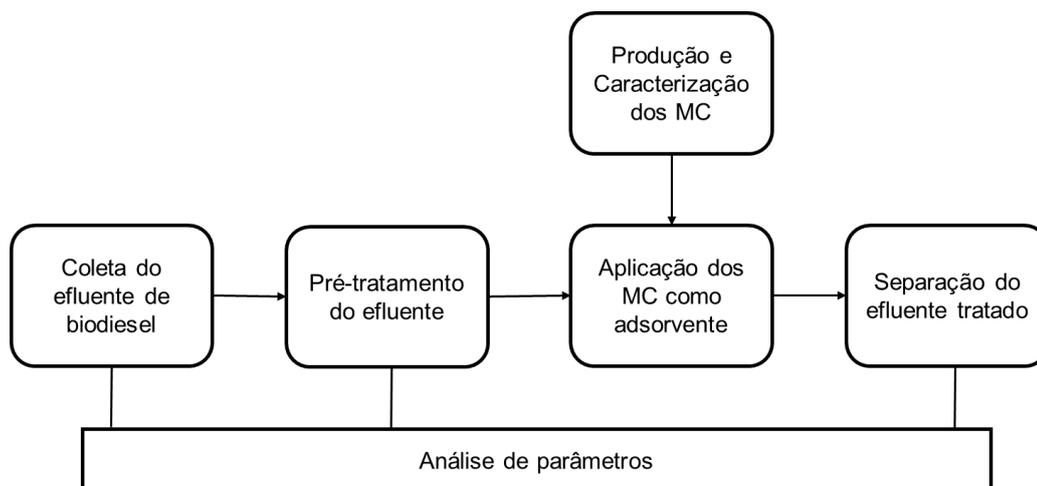
3.4 Metodologia

Este projeto envolve cinco principais etapas:

- a) produção e caracterização dos MC;
- b) coleta e análise de parâmetros do efluente de biodiesel;
- c) pré-tratamento do efluente e análise de parâmetros;
- d) aplicação dos MC como adsorvente para a purificação do efluente e definição das melhores condições;
- e) separação do efluente tratado e análise de DQO.

O fluxograma apresentado pela Figura 3 mostra as principais etapas de realização deste estudo:

Figura 3 - Fluxograma demonstrativo das etapas da metodologia do estudo



Fonte: Autora.

3.4.1 Preparação das fibras do coco

Após a definição do material a ser estudado, foi desenvolvida uma etapa de preparação deste. Primeiramente, os cocos verdes foram cedidos por vendedor local, e segundo este, os frutos foram todos obtidos do mesmo fornecedor. Todo material utilizado no estudo foi coletado apenas uma única vez, de modo a evitar que houvesse variações expressivas nas composições das amostras.

Os frutos foram fragmentados e submetidos à secagem natural por exposição ao sol. Em seguida, realizou-se a separação manual da casca dos frutos, separando a fração de interesse no estudo: o mesocarpo (feixes de fibras), conforme indicado pela Figura 4.

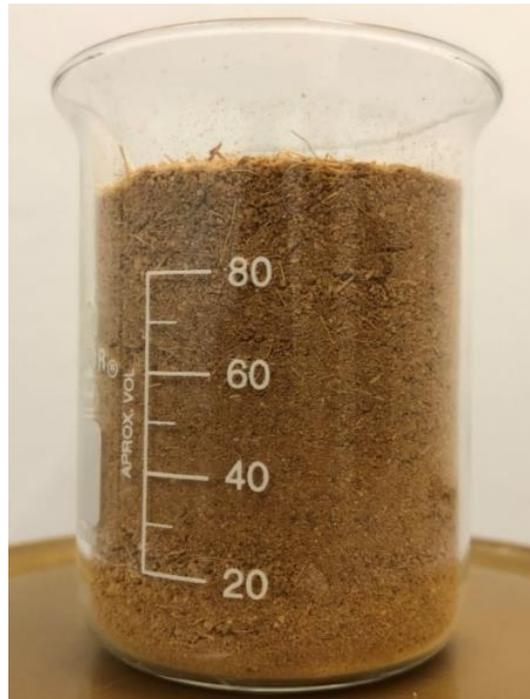
Figura 4 - Fibras de coco



Fonte: Autora.

Com o auxílio de uma tesoura, as fibras foram fracionadas em partes menores e submetidas a um processo de trituração em moinho de corte e peneiradas até tamanho de partículas inferiores a #30 mesh, conforme indicado pela Figura 5. Todo material processado foi utilizado nos demais estudos.

Figura 5 - Fibras de coco trituradas em peneira de 30 mesh



Fonte: Autora.

Apesar da metodologia proposta nas literaturas utilizadas como base neste estudo considerarem a etapa de lavagem do material, a mesma não foi realizada a fim de minimizar operações unitárias.

3.4.2 Caracterização das fibras do coco

Uma vez preparado o material, foram realizadas as análises de TG/DTG, DRX e FTIR das fibras naturais para que fosse possível a visualização do perfil da fração estudada, e assim, definir a melhor temperatura de queima para obtenção do material carbonoso.

3.4.2.1 Análises termogravimétricas

As análises de TG/DTG foram realizadas em termobalança SHIMADZU, modelo TGA-50, pertencente ao LOQ da EEL/USP.

Tais análises térmicas foram conduzidas em uma faixa de temperatura de até 900°C com taxa de aquecimento de 10°C/min, em atmosfera de gás nitrogênio com fluxo de 50 mL/min. Todas as amostras foram analisadas em panela de platina.

3.4.2.2 Difratomia de raios X

Para a realização da análise de DRX, foi utilizado um Difrátômetro de Raios X, marca PANalytical, modelo Empyrean, disponível no Laboratório de Caracterização de Materiais (LabMat) do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

3.4.2.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

As análises de FTIR foram realizadas em um Espectrômetro Perkin Elmer, modelo Spectrum GX, disponível no LabMat do ITA.

3.4.3 Calcinação das FC para obtenção do material carbonoso

Realizadas as análises das fibras do coco *in natura*, foram definidas as temperaturas de calcinação para obtenção dos MC, desta forma, utilizou-se um forno tipo mufla (marca Spenser Equipamentos) com taxa de aquecimento de 30°C/min, pertencente ao LOQ da EEL/USP, para a produção do material.

A Tabela 5 indica como foi realizada a identificação de cada amostra, relativa ao seu tempo e temperatura de calcinação.

Tabela 5 - Esquema de identificação das amostras calcinadas

Temperatura	Tempo de queima		
	1h	3h	5h
300°C	MC3001H	MC3003H	MC3005H
500°C	MC5001H	MC5003H	MC5005H

Fonte: Autora.

Após o processo, para posterior utilização, as amostras foram acondicionadas em recipientes identificados conforme tempo e temperatura de calcinação.

3.4.4 Caracterização dos MC

As seis amostras de MC foram submetidas às análises TG/DTG, DRX e FTIR para um melhor conhecimento de suas características.

3.4.5 Coleta e caracterização do efluente de biodiesel

O efluente de biodiesel utilizado neste estudo foi gerado no Laboratório de Biocombustíveis da EEL/USP, que utiliza óleo de cozinha residual, etanol e catalisador básico (hidróxido de potássio) para produção do biodiesel.

Inicialmente, todo o volume do efluente obtido, em seu estado bruto (E0), foi homogeneizado e em seguida, armazenado em garrafas de vidro âmbar.

Para caracterização do efluente E0 foram realizadas análises quantitativas de parâmetros e estudo qualitativo a partir de experimentos prévios de adsorção.

3.4.5.1 Análises quantitativas

Buscando verificar as condições do efluente coletado, foram realizadas análises de parâmetros de caráter quantitativo. Tais análises tiveram como finalidade fornecer informações a respeito do efluente bruto, de modo a auxiliar o desenvolvimento das etapas de tratamento. Para isso, foram analisados os seguintes parâmetros:

- a) temperatura;
- b) pH;
- c) condutividade;
- d) turbidez;
- e) cor;
- f) oxigênio dissolvido (OD);

- g) óleos e graxas (OG);
- h) demanda química de oxigênio (DQO).

Foram adotados nesse estudo os limites de concentrações estabelecidos pelas Resoluções CONAMA n° 357 e n° 430 que dispõem sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.

A Resolução CONAMA n° 357 de 2005 também classifica os corpos d'água receptores, sendo tal classificação definida de acordo com a finalidade do corpo hídrico que recebe o efluente. Assim, considerou-se padrões de qualidade de água relativos aos corpos d'água classe 3, que segundo esta legislação, tem suas águas destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
- c) à pesca amadora; d) à recreação de contato secundário; e e) à dessedentação de animais.

A Tabela 6 associa os parâmetros analisados com os limites estabelecidos pelas Resoluções.

Tabela 6 - Limites de parâmetros físico-químicos para descarte em corpos d'água classe 3

Temperatura	< 40°C
pH	6,0 a 9,0
Condutividade	100 a 1000 µS/cm
Turbidez	100 UNT
Cor	Nível de cor natural do corpo de água até 75 mg.Pt/L
OD	>= 4 mg/mL
OG	Mineral ≤ 20 mg/L Vegetal ou Animal ≤ 50 mg/L
DQO	-

Fonte: Adaptado de BRASIL. CONAMA (2005, 2011).

Apesar da ausência de limite para o parâmetro DQO nas legislações adotadas neste estudo, optou-se pela realização desta análise visto que se trata de uma determinação mais

rápida que a DBO e demanda pouco volume de amostra (BAIRD; CANN, 2011; VON SPERLING, 1996, p. 69).

As análises dos parâmetros Temperatura, pH, Condutividade e Turbidez foram realizadas com auxílio de equipamentos próprios para medição, enquanto as análises dos parâmetros Cor, OD, OG e DQO seguiram o Manual Prático para as Metodologias Analíticas do Laboratório de Meio Ambiente EEL/USP, que utiliza como referência as metodologias previstas no livro Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998).

3.4.5.1.1 Temperatura, pH e condutividade

Os valores relativos aos parâmetros Temperatura e pH foram obtidos através de pHmetro (marca Spenser scientific, modelo SP3611) e para obtenção da Condutividade foi utilizado um medidor de condutividade (marca Gehaka, modelo CG1800).

3.4.5.1.2 Turbidez

Para a análise quantitativa do parâmetro Turbidez foi utilizado um Turbidímetro da marca TecnoPON, modelo TB-1000, calibrado com amostras de 0,1; 0,8; 8; 80 e 1000 NTU.

3.4.5.1.3 Cor

A leitura do parâmetro Cor foi realizada em espectrofotômetro manual (marca Spenser Hipperquímica, modelo IL-226) ajustado em um comprimento de onda de 455 nm e os resultados obtidos foram calculados através da equação, que descreve a curva analítica utilizada.

$$y = 0,0003x - 0,0007$$

Sendo (y) equivalente ao valor de absorvância determinado pelo equipamento e (x) ao valor do parâmetro Cor em mg.Pt/L.

3.4.5.1.4 Oxigênio dissolvido

Para a análise de OD, primeiramente, foi realizada preparação do frasco. Para isso, preencheu-se um frasco B.O.D (DBO) de 300 mL com o efluente a ser analisado, evitando-se formação de bolhas de ar. Em seguida, foram adicionados 2 mL de $MnSO_4$ e 2 mL de NaN_3 . O frasco foi tampado, agitado e colocado para decantar, e então, agitado novamente. Por fim, 2 mL de sulfato manganoso (H_2SO_4) concentrado foram adicionados à solução.

Foram transferidos 200 mL da solução preparada no frasco para um erlenmeyer e realizou-se a titulação com uma bureta de 10 mL contendo tiosulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) fatorado ($f = 1,096175$), até alcançar a coloração amarelo claro. Então, foram adicionados 2 mL de Goma de Amido (indicador) atingindo coloração azul intensa e a titulação foi prosseguida até a solução se tornar incolor.

Para a obtenção do valor relativo ao OD da amostra, utilizou-se as Equações 1 e 2:

$$\% \text{ m/v} = \frac{100 * (N * V * f)_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} * (\text{Eq.g})_{\text{O}_2}}{V_{\text{amostra}}} \quad (1)$$

$$\text{OD [mg/L]} = (\% \text{ m/v}) * 10^4 \quad (2)$$

Sendo:

V = Volume consumido de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ [L]; V_{amostra} = Volume da amostra titulada [mL].

3.4.5.1.5 Óleos e graxas

Inicialmente, para a realização da análise do parâmetro OG, foi obtido o peso real de um balão de fundo chato. Para isso, realizou-se a lavagem do balão, secagem em estufa a 100°C por 1h, armazenagem em dessecador por 1h e posterior pesagem em balança analítica.

A amostra foi emulsificada em um liquidificador, acidificada com HCl até alcançar o pH 2 e aquecida em chapa entre 60°C e 70°C com agitação manual. Para a adsorver o óleo presente na amostra, foram adicionadas 2 espátulas de terra de diatomáceas e após o tempo de reação de 15 min, a amostra foi resfriada com banho de gelo até atingir a temperatura ambiente.

Em seguida, foi realizada a filtração a vácuo da amostra a fim de promover a separação da terra de diatomácea contendo o óleo adsorvido. Então, o filtro foi secado em estufa em 50°C durante 1h e armazenado em dessecador por mais 1h.

Para realização da extração do óleo contido na amostra, foi preparado um cartucho contendo terra de diatomácea obtida no processo de filtração a vácuo, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Cartucho de terra de diatomácea para análise de OG



Fonte: Autora.

Para garantir a proteção do cartucho, as mesmas dobras foram repetidas em um novo papel de filtro.

Por fim, foi utilizado um extrator Soxhlet limpo e seco a 100°C, e como solvente, foram necessários aproximadamente 150 mL de hexano P.A., suficiente para cobrir a amostra analisada. O sistema foi preparado conforme mostrado pela Figura 7.

Figura 7 - Sistema de extração Soxhlet para análise de OG



Fonte: Autora.

O sistema Soxhlet foi aquecido a 100°C e mantido por 4h. Após esse período, o balão foi secado em estufa a 60°C para eliminar o hexano residual. Por fim, o balão foi colocado em um dessecador por 1h e em seguida, pesado em uma balança analítica.

Para o cálculo do parâmetro utilizou-se a seguinte equação:

$$\text{OG (mg/L)} = \frac{(m_f - m_i) \times 10^6}{V_a}$$

Sendo: m_f (massa do balão após extração do óleo em gramas); m_i (massa do balão vazio em gramas); V_a (Volume da amostra utilizada em mililitros).

3.4.5.1.6 Demanda química de oxigênio

Para a análise do parâmetro DQO, inicialmente, foram preparadas soluções em tubo de ensaio com:

- a) 40 a 50 mg de Hg_2SO_4 ;
- b) 2,5 mL de AgHSO_4 ;
- c) 0,5 mL de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (1,0 Eq/L);
- d) 0,3 mL de água deionizada;
- e) 2,0 mL de amostra.

Cada solução foi submetida a elevação de temperatura em digestor por 1h 30min e após o resfriamento, as soluções foram analisadas em espectrofotômetro manual (marca Spencer Hipperquímica, modelo IL-226) com ajuste de comprimento de onda equivalente a 620 nm.

3.4.5.2 Análises qualitativas

Os primeiros experimentos de adsorção foram desenvolvidos com o objetivo de estudar os efeitos da interação entre o adsorvente e o efluente bruto (E0), ou seja, sem nenhum tipo de tratamento prévio.

As concentrações das misturas de MC em água de lavagem de biodiesel foram fixadas em 1% e 5% e para cada uma delas foram feitos oito ensaios, variando o tempo de agitação entre 15 e 1440 minutos.

Para a execução dos ensaios de adsorção em concentração de 1% foram utilizados 0,75g de amostra MC3001H e 75 mL de E0. Já nos experimentos em concentração de 5% foram utilizados 2,5g de amostra MC5001H e 50mL de E0.

A Tabela 7 indica como os ensaios foram divididos, relacionando as amostras com as concentrações e tempos de agitação.

Tabela 7 - Experimentos de adsorção em E0

Amostra	Concentração	Tempo de agitação (min)
A1	1%	15
A2		30
A3		60
A4		90
A5		120
A6		240
A7		360
A8		1440
B1	5%	15
B2		30
B3		60
B4		90
B5		120
B6		240
B7		360
B8		1440

Fonte: Autora.

Os experimentos foram realizados em Banho Maria Metabólico com Agitação Orbital tipo Dubnoff e o equipamento foi ajustado a uma temperatura constante de 30°C e velocidade de agitação constante de 120 r.p.m.

3.4.6 Pré-tratamento do efluente E0

Após os estudos de caracterização do efluente E0, verificou-se a necessidade de submetê-lo a uma série de etapas antecedentes ao tratamento por adsorção. Desta forma, este

processo foi nomeado pré-tratamento e foi dividido em 2 etapas: (1) Acidificação e Separação e (2) Filtração Simples.

3.4.6.1 Acidificação e separação

Para remover o excesso de óleo presente em E0, foram adicionados 2 mL de ácido clorídrico (HCl) concentrado (36% m/m) para cada 300 mL de amostra. A fase oleosa formada foi separada com auxílio de um funil de separação e a amostra obtida nessa etapa foi identificada como E1.

3.4.6.2 Filtração simples

A segunda etapa do pré-tratamento consistiu em realizar uma filtração simples, para remover o óleo residual ainda visível no efluente. Para isso, utilizou-se papel filtro qualitativo e funil. A amostra obtida nessa etapa foi identificada como E2.

3.4.7 Caracterização das etapas de pré-tratamento

Para que fosse possível realizar uma comparação com o efluente E0, as amostras relativas a cada etapa do processo de pré-tratamento do efluente (E1 e E2) foram caracterizadas a partir de análises quantitativas, seguindo o padrão realizado anteriormente para E0. Desta forma, considerou-se as metodologias de análises descritas no tópico 3.4.5.1 para os parâmetros Temperatura, pH, Condutividade, Turbidez, Cor, OD, OG e DQO.

3.4.8 Ensaios de adsorção e caracterização

Obtido o efluente pré-tratado (amostra E2), iniciou-se o estudo das melhores condições de adsorção. Primeiramente, a partir de experimentos de adsorção, foram avaliados os seguintes parâmetros: Concentração, pH e Tempo de agitação. Em seguida, após a fixação desses parâmetros, foram realizados novos ensaios de adsorção, para então, avaliar o comportamento das amostras de MC no tratamento do efluente E2.

Visando otimizar os experimentos, a amostra de adsorvente MC3001H foi utilizada para a realização dos primeiros ensaios (tópicos 3.4.8.1 e 3.4.8.2) devido à maior facilidade de produção. O objetivo dos primeiros ensaios foi verificar o impacto da alteração da concentração de adsorvente, pH e tempo de agitação e fixar tais parâmetros para os ensaios posteriores.

3.4.8.1 Concentração x pH

Para associar os parâmetros concentração e pH, foram analisadas amostras sem adição de material carbonoso (branco) e amostras com 2% e 5% de concentração, visto que a baixa densidade do material dificulta a realização dos experimentos em maiores concentrações. Além disso, o parâmetro pH foi variado entre 1,5 e 10, abrangendo as faixas ácida, neutra e básica.

Quanto ao tempo de contato, o processo de adsorção ocorre de forma mais acentuada logo nos primeiros minutos, devido à grande quantidade de regiões livres no adsorvente. Isso pode ser visto em estudos como os realizados por Melliti *et al.* (2023) e Sultana *et al.* (2022) que utilizaram fibras naturais como adsorvente e apresentaram significativas porcentagens de remoção dos compostos antes da primeira hora de contato.

Desta maneira, fixou-se, inicialmente, o tempo de adsorção em 30 min, de modo a facilitar o estudo das variáveis concentração e pH. Cabe destacar que o estudo variando o tempo de adsorção foi realizado após a identificação das melhores condições dos parâmetros abordados neste tópico.

O Quadro 1 apresenta a distribuição das amostras para o estudo de Concentração x pH.

Quadro 1 - Distribuição dos experimentos de adsorção para estudo das variáveis concentração e pH utilizando MC3001H

pH	Branco	MC3001H	
		2%	5%
1,5	A1	A2	A3
4,5	A4	A5	A6
5	A7	A8	A9
5,5	A10	A11	A12
8	A13	A14	A15
10	A16	A17	A18

Fonte: Autora.

Ao final dos experimentos, as amostras foram filtradas a vácuo e as frações de MC e efluente foram devidamente acondicionadas e identificadas.

Para nortear o estudo das próximas etapas, optou-se pela caracterização das amostras obtidas por meio do parâmetro DQO, uma vez que se trata de uma análise mais rápida e que requer pouco volume de amostra, otimizando assim, os experimentos. Além disso, de forma indireta, esse parâmetro relaciona a quantidade de matéria orgânica presente no efluente, pois indica a concentração de oxigênio demandado para estabilizá-la (VON SPERLING, 1996, p. 69).

Com isso, todas as amostras líquidas obtidas nesta etapa foram submetidas a análise de DQO, seguindo a mesma metodologia descrita no tópico 3.4.5.1.6.

3.4.8.2 Tempo

Com base nos resultados da etapa anterior, novos ensaios foram efetuados, dessa vez, variando o tempo de exposição. A concentração foi fixada em 2% e o pH mantido em faixa ácida, avaliando-se os valores 1,5 e 4,5. O Quadro 2 mostra como foram divididas as amostras experimentais para o estudo relativo ao tempo.

Quadro 2 - Distribuição dos experimentos de adsorção para estudo da variável Tempo utilizando MC3001H

Tempo	pH	
	1,5	4,5
Branco	A1	A2
15 min	A3	A4
30 min	A5	A6
60 min	A7	A8
120 min	A9	A10

Fonte: Autora.

Após a execução dos experimentos, foi realizada a filtração a vácuo das amostras e as frações de MC e efluente foram acondicionadas e identificadas. Prontamente, avaliou-se o parâmetro DQO de cada amostra líquida.

3.4.8.3 Material carbonoso

Esta etapa teve como objetivo estudar o comportamento dos MC, produzidos no estudo, quando colocados em contato com o efluente de biodiesel. Para isso, foram

realizados ensaios de adsorção em condições pré-estabelecidas, definidas com base nos resultados das etapas anteriores da pesquisa. Os parâmetros fixados estão indicados na Tabela 8.

Tabela 8 - Condições estabelecidas para os experimentos de adsorção (estudo dos MC)

Parâmetro	Condição
Temperatura	30°C
Tempo de agitação	60 min
pH	4,5
Concentração (MC)	2%

Fonte: Autora.

Logo, para cada amostra de MC (MC3001H, MC3003H, MC3005H, MC5001H, MC5003H e MC5005H), foram executados cinco experimentos de adsorção, totalizando 30 ensaios. Para alcançar a concentração de 2%, as amostras foram devidamente pesadas (0,15g de MC cada) e colocadas em erlenmeyers com 75mL de efluente E2.

O Quadro 3 apresenta como foi realizada a distribuição das amostras.

Quadro 3 - Distribuição dos experimentos de adsorção para o estudo dos MC

Ensaio	MC					
	3001H	3003H	3005H	5001H	5003H	5005H
I	A1	A6	A11	A16	A21	A26
II	A2	A7	A12	A17	A22	A27
III	A3	A8	A13	A18	A23	A28
IV	A4	A9	A14	A19	A24	A29
V	A5	A10	A15	A20	A25	A30

Fonte: Autora.

As misturas foram filtradas a vácuo, seguindo o mesmo procedimento dos tópicos anteriores. Os materiais separados foram devidamente acondicionados e logo após, avaliou-se o parâmetro DQO das amostras de efluente líquido.

4 Resultados e Discussão

Este tópico expõe e discute os resultados obtidos nas etapas de caracterização da amostra FC, produção e análise dos MC e ensaios de adsorção.

4.1 Caracterização das fibras do coco

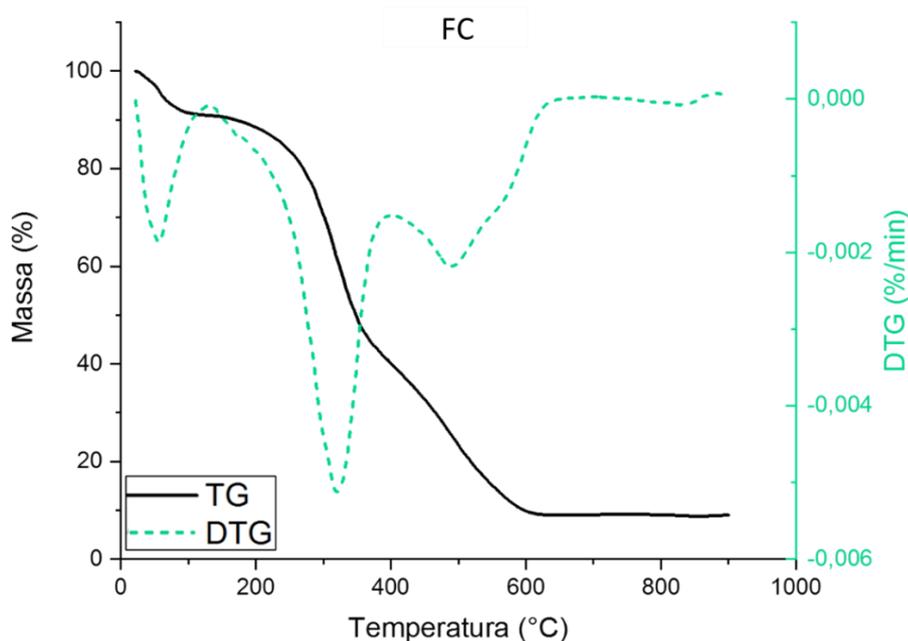
Os resultados apresentados neste tópico detalham as análises TG/DTG, DRX e FTIR realizadas para a amostra FC.

4.1.1 Análises termogravimétricas

A análise termogravimétrica é uma técnica amplamente utilizada para avaliar a estabilidade térmica dos materiais, a qual se monitora a perda de massa de uma amostra sujeita a um perfil de temperatura controlado (HUANG; TENG; LI, 2022; PIELICHOWSKI; NJUGUNA; MAJKA, 2023).

A Figura 8 indica as curvas TG e DTG obtidas na análise da amostra de FC.

Figura 8 - Curvas TG/DTG de FC em atmosfera de N₂



Fonte: Autora.

A análise termogravimétrica de FC, indicou uma perda de massa em uma faixa de temperatura inferior a 100°C, característica da evaporação de água que pode ser atribuída à holocelulose, responsável pela natureza hidrofílica da fibra *in natura* (CARDOSO *et al.*, 2021).

Também é possível identificar outro evento térmico, responsável pela redução de aproximadamente 60% da massa da amostra e situado no intervalo de 200-400°C. De acordo com Lopes e Tannous (2022), essa faixa de temperatura está associada à degradação da hemicelulose e celulose. No entanto, também pode-se atribuir à decomposição de lignina, que possui sua faixa de degradação entre 350°C e 500°C. Logo em seguida, de 400°C a 630°C, é possível observar um outro intervalo de perda de massa que pode ser associado à decomposição de lignina residual (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006; MASCHIO; PEREIRA; SILVA, 2012).

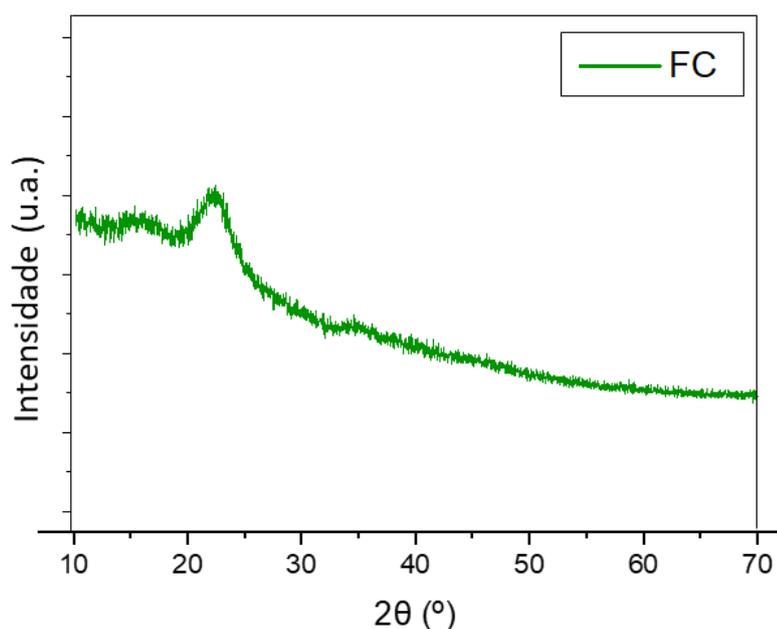
Desta maneira, uma vez que se buscou obter um material carbonoso para o desenvolvimento do estudo, foram definidas as temperaturas de 300°C e 500°C para a calcinação da FC.

4.1.2 Difratomia de raios X

A técnica de DRX consiste na dispersão da radiação (raios X) nas estruturas cristalinas. Através dos difratogramas gerados é possível identificar fases, avaliar a qualidade e estrutura do cristal, determinar orientações e medir parâmetro de rede (CAI *et al.*, 2021; SCHACHEL *et al.*, 2020).

A Figura 9 apresenta o difratograma de Raios X referente à amostra FC.

Figura 9 - Difrátograma de raios X da amostra FC



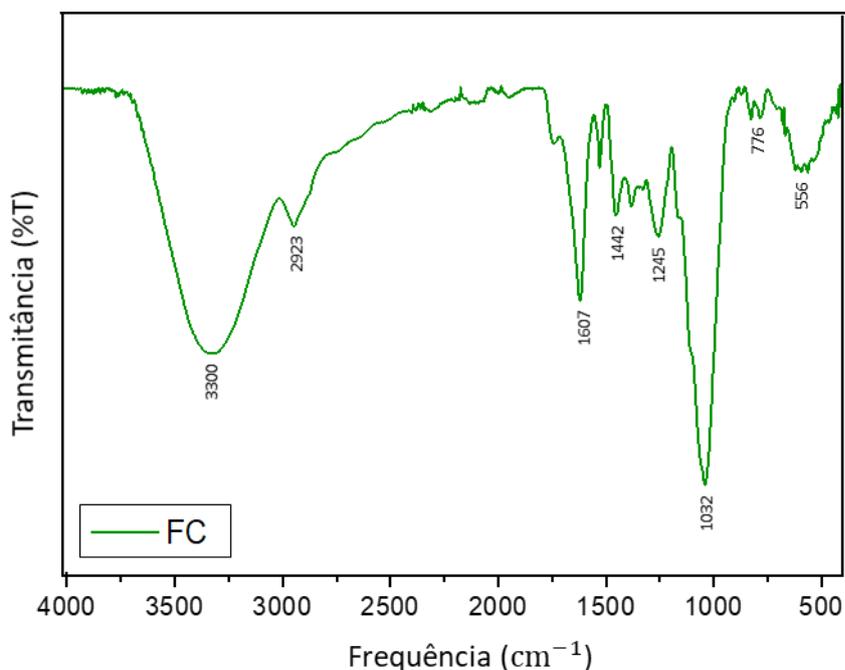
Fonte: Autora.

O padrão de DRX da amostra FC apresenta um ombro mais evidente próximo a $2\theta = 23^\circ$, evidenciando a existência de carbono na forma de grafite hexagonal amorfo, que prevalece nas fibras de coco *in natura* (YUAN *et al.*, 2021; SAWADSITANG *et al.*, 2021). De acordo com Kramer *et al.* (2014), o DRX das fibras de coco apresenta ombros situados entre 15° e 37° relativos às estruturas típicas da celulose, hemicelulose e lignina.

4.1.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

A análise de FTIR, através de seus espectros, permite a caracterização química da amostra, uma vez que fornece respostas relativas às estruturas e grupos funcionais existentes (FAN *et al.*, 2021). O espectro obtido na análise da amostra FC pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Espectros FTIR da amostra FC



Fonte: Autora.

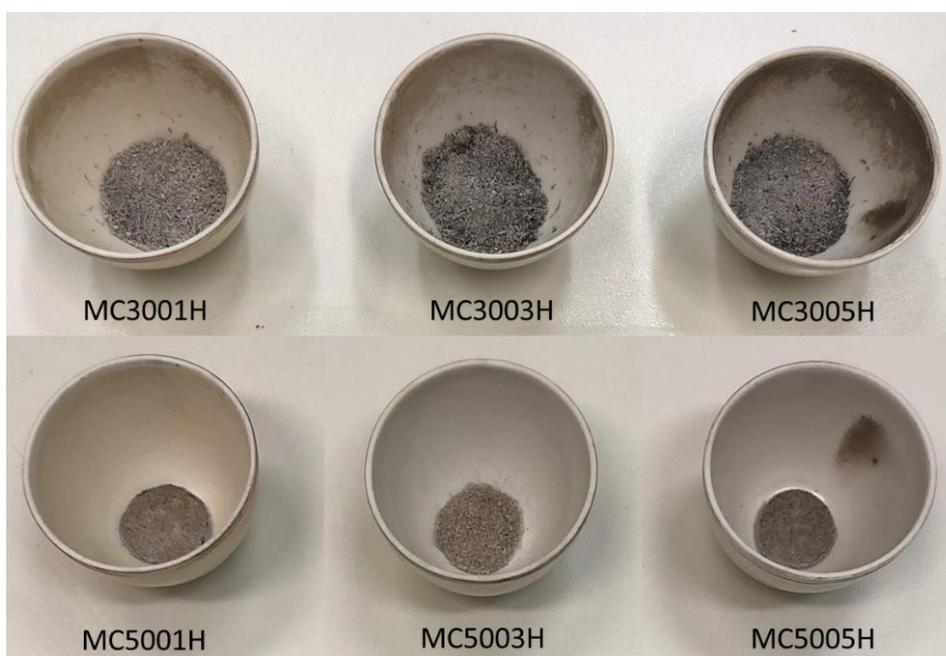
A banda localizada em $\sim 3300 \text{ cm}^{-1}$ pode ser atribuída à ligação O-H do grupo hidroxila, devido à presença da molécula H_2O que se forma nas superfícies e às estruturas de celulose e lignina (MISHRA; BASU, 2020; SAWADSITANG *et al.*, 2021). Desta forma, ao analisar o espectro FTIR, atribui-se essa banda à umidade presente nas fibras e às estruturas típicas da fibra natural.

4.2 Calcinação de FC para obtenção de material carbonoso

Com o intuito de encontrar as melhores condições de queima em forno mufla, amostras de 1g de FC foram calcinadas a temperatura de 300°C e 500°C, com tempo de patamar de queima de 1h, 3h e 5h para cada temperatura, taxa de aquecimento de 30°C/min em atmosfera não controlada.

As queimas realizadas a temperatura de 300°C e 500°C geraram amostras de MC com características conforme é possível observar na Figura 11.

Figura 11 - Amostras calcinadas em 1h, 3h e 5h em temperaturas de 300°C e 500°C



Fonte: Autora.

Para a obtenção de amostras de MC em maiores quantidades a fim de serem utilizadas nos posteriores experimentos de adsorção, optou-se por recipientes de maior capacidade (caçarola de porcelana), possibilitando a queima de 60g de FC por recipiente.

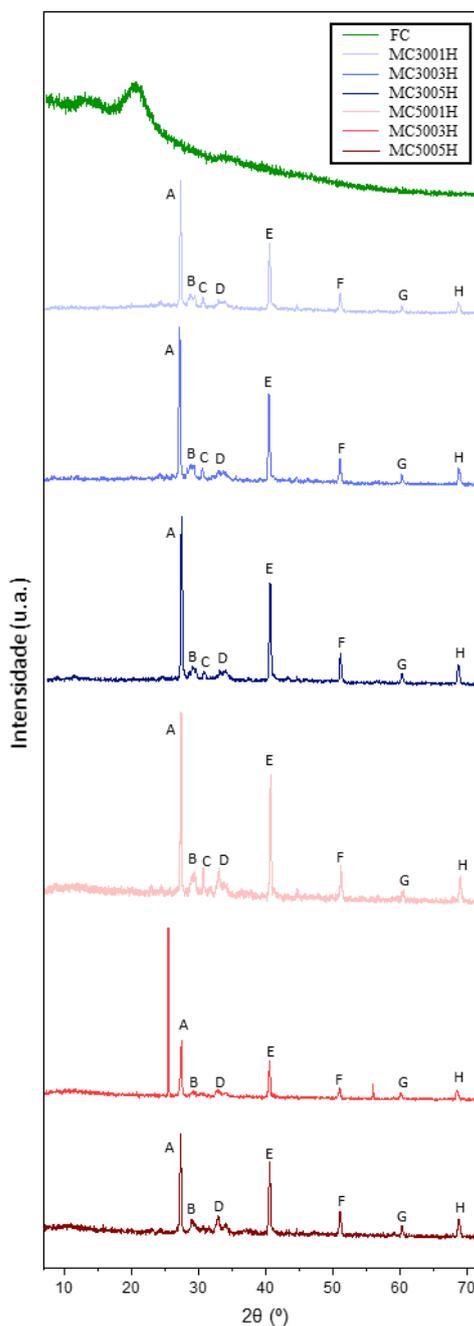
4.3 Caracterização do material carbonoso

Obtidas as amostras de MC em diferentes condições de queima, foram realizadas análises TG/DTG, DRX e FTIR com objetivo de caracterizá-las. Este tópico descreve os resultados adquiridos, abordando em maiores detalhes os comportamentos, componentes e ligações existentes nas amostras MC geradas.

4.3.1 Difratometria de raios X

A Figura 12 apresenta os difratogramas de raios X obtidos para as amostras calcinadas a 300°C (MC3001H, MC3003H e MC3005H) e 500°C (MC5001H, MC5003H e MC5005H) e as compara com a curva da amostra FC. As análises dos picos e identificação das principais espécies foram feitas por meio das programações Powdercell e Pearson's Crystal.

Figura 12 - Difratomogramas de raios X das amostras FC e MC



Fonte: Autora.

Ao analisar os difratogramas de raios X dos MC gerados a 300°C e 500°C, verifica-se que o tratamento térmico efetuado promoveu a degradação do material celulósico, uma vez que, diferentemente do que ocorre no padrão da amostra FC, não é visto o ombro referente à celulose na região abaixo de 30°.

No que se refere às características comuns entre os MC produzidos a 300°C e 500°C, nota-se a presença de três picos mais intensos (A, E e H), localizados, respectivamente, nas faixas 28,20 - 28,80°, 40,50 - 40,90° e 66,35 - 66,85°. Esses picos foram identificados como misturas, uma vez que, a partir dos levantamentos de dados realizados, foi encontrado mais de um composto influenciando sua formação.

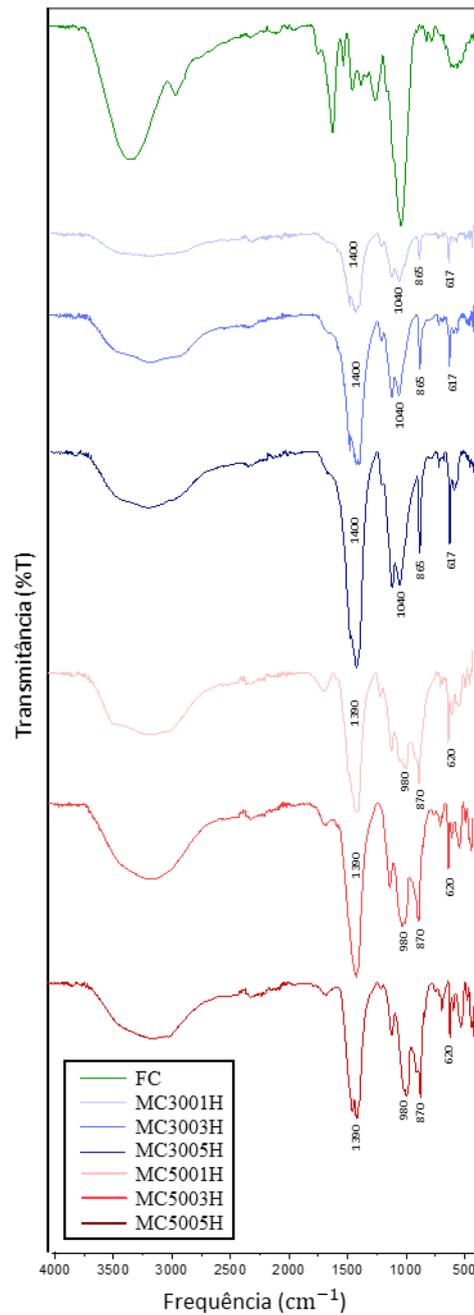
Desta forma, foram definidas as seguintes misturas: A - tricloreto de fósforo (PCl_3), trióxido de difósforo (P_2O_3) e dicloro (Cl_2); E – óxido de manganês II (MnO), tetróxido de difósforo (P_2O_4) e óxido de ferro III (Fe_2O_3); e H – trióxido de enxofre (SO_3), superóxido de potássio (KO_2) e pentóxido de difósforo (P_2O_5). Além disso, notou-se também a presença de outros picos relevantes no material carbonoso produzido, tanto em 300°C quanto em 500°C. Na região localizada entre 29,40° e 35,00°, indicadas nos gráficos pelos pontos B, C e D, foram identificados, respectivamente, três diferentes óxidos de fósforo: nanóxido de tetrafósforo (P_4O_9), heptóxido de tetrafósforo (P_4O_7) e pentóxido de difósforo (P_2O_5); estes óxidos foram indicados por pequenos ombros de intensidades semelhantes, apesar de um pouco mais destacados na amostra MC5001H em relação às outras. O pico F, formado próximo a 50,40°, mostrou-se relativo ao SiO_2 e o pico G, formado em aproximadamente 58,90°, indicou a presença do composto MnO .

De forma geral, os MC calcinados a 300°C e a 500°C apresentaram picos característicos bastante semelhantes e ao analisar suas intensidades, nota-se que amostra MC5001H apresenta picos mais intensos. Além disso, observa-se um pico intenso situado em 26,93° e um outro pequeno pico em 55,13° na amostra MC5003H, isso pode ser explicado devido ao fato de que o material natural é heterogêneo, e apesar da metodologia de preparação envolver a trituração e homogeneização das amostras, as composições das frações analisadas podem variar.

4.3.2 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier

A Figura 13 compara os espectros FTIR obtidos nas análises das amostras FC e MC calcinadas a 300°C e 500°C.

Figura 13 - Espectros FTIR para as amostras FC e MC



Fonte: Autora.

Ao comparar os espectros FTIR das amostras de MC produzidas e da amostra FC, verifica-se que houve uma significativa alteração na composição do material ao submetê-lo ao tratamento térmico.

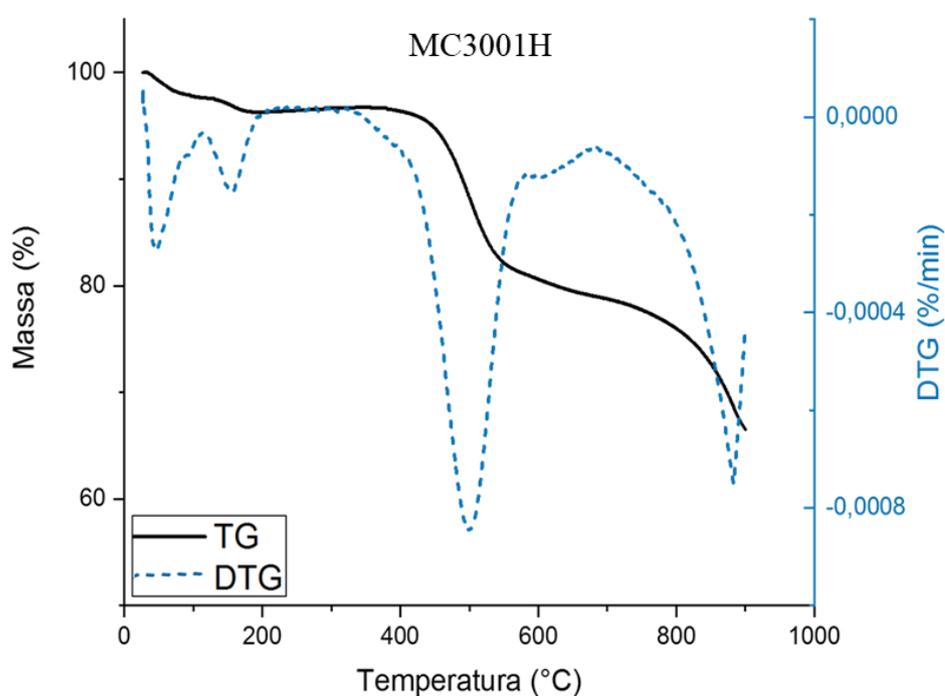
Observa-se, no intervalo de comprimento de onda de $3700\text{-}2520\text{ cm}^{-1}$, uma banda larga de estiramento O-H referente ao grupo SiOH. Nesse intervalo também podem surgir os estiramentos de álcoois, o que está perfeitamente viável pela forma como a banda (estendida e achatada) se encontra. Isso demonstra uma mistura de absorções provenientes

de vários compostos hidroxilados. No intervalo de aproximadamente $1110\text{-}830\text{ cm}^{-1}$ observa-se uma série de picos, onde encontra-se a vibração da ligação Si-O, que coincidem também com as hidroxilas de álcoois (SILVERSTEIN *et al.*, 2019; YOUSEFIAN *et al.*, 2023).

4.3.3 Análises termogravimétricas

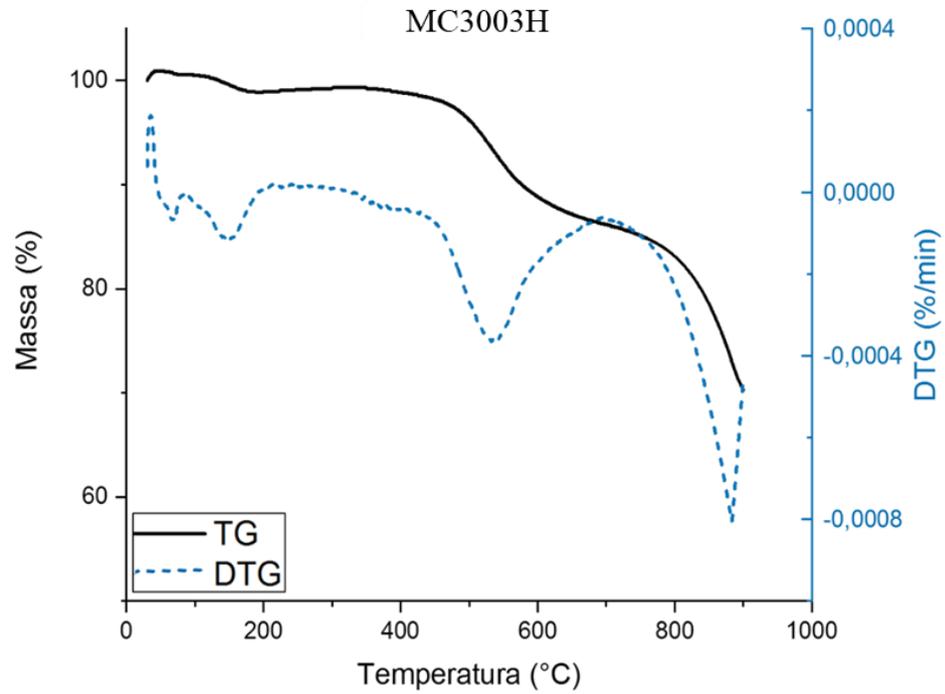
As Figuras 14-19 indicam as curvas TG e DTG das amostras de MC calcinadas a 300°C , para taxa de aquecimento constante de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, em atmosfera de nitrogênio.

Figura 14 - Curvas TG/DTG de MC3001H em atmosfera de N_2



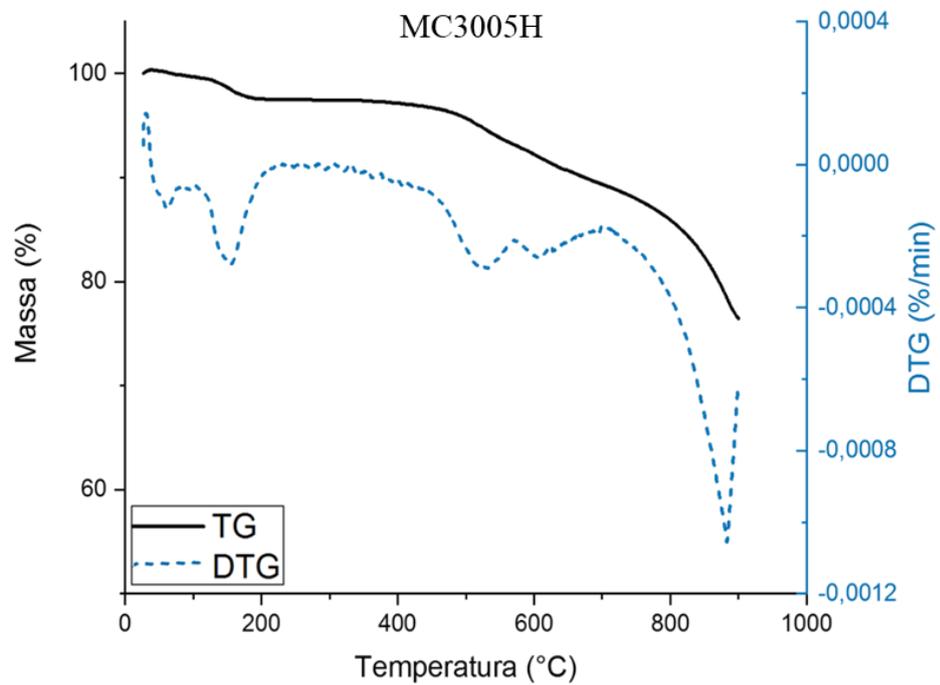
Fonte: Autora.

Figura 15 - Curvas TG/DTG de MC3003H em atmosfera de N₂



Fonte: Autora.

Figura 16 - Curvas TG/DTG de MC3005H em atmosfera de N₂



Fonte: Autora.

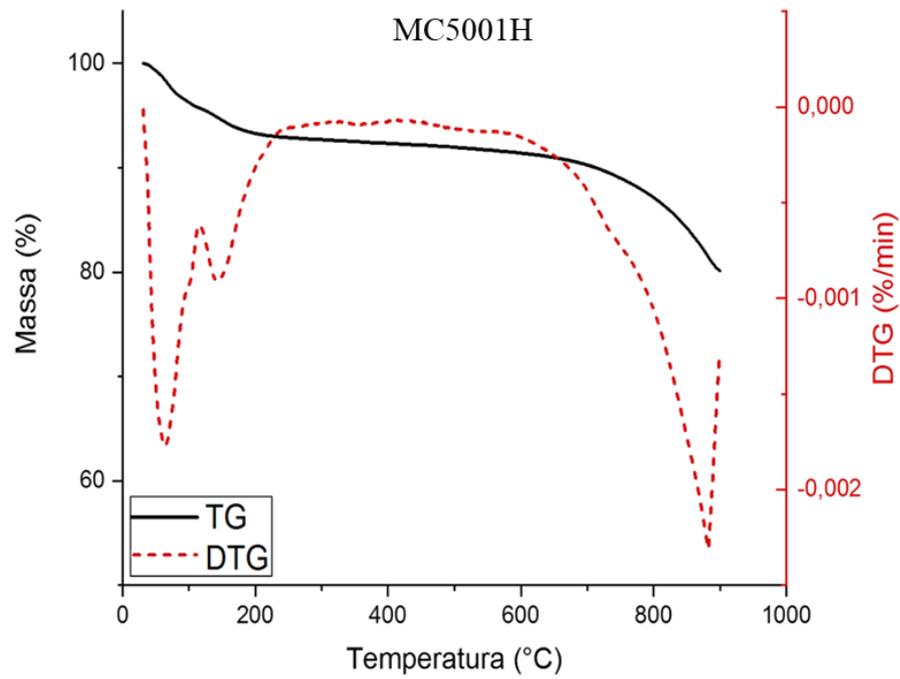
Ao analisar as Figuras 14-16, que descrevem a degradação térmica do material calcinado a 300°C, um comportamento similar para os tempos de queima de 1, 3 e 5 horas é observado.

Na faixa de temperatura de até 300°C, ocorrem dois eventos seguidos de perda de massa. Lima *et al.* (2014) afirma que as fibras de coco são ricas em polifenóis, as quais possuem alta estabilidade. Desta maneira, os eventos térmicos ocorrentes nessa faixa podem indicar a presença de matéria orgânica de difícil degradação térmica, ou seja, estruturas complexas e termicamente estáveis que não estariam se decompondo com o tratamento térmico efetuado.

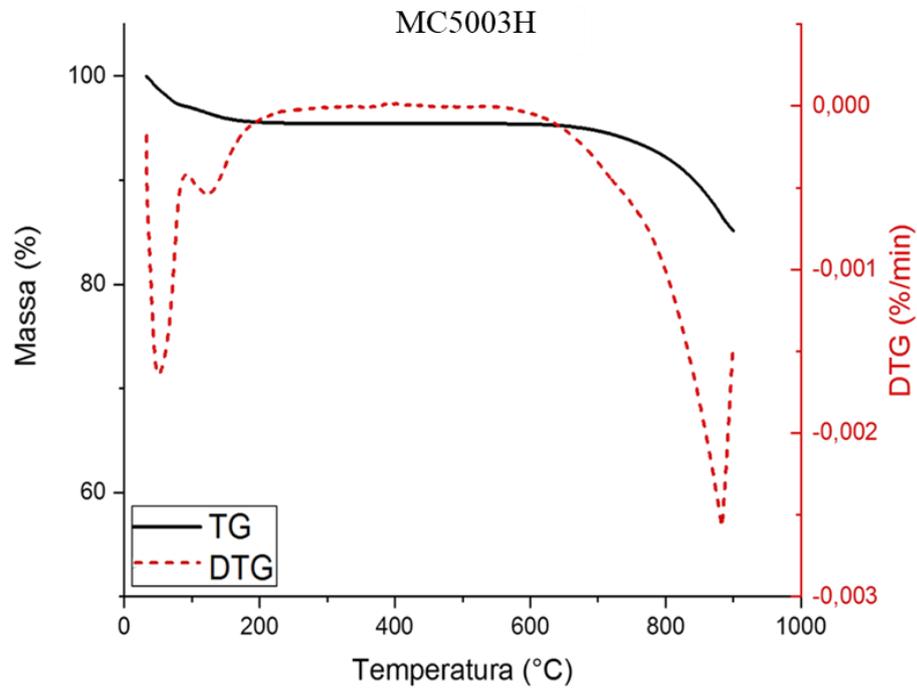
Além disso, no intervalo de aproximadamente 400-700°C foi observada a presença de materiais carbonosos (celulose, hemicelulose e lignina). Nessa faixa, identifica-se que quanto maior o tempo de queima para obtenção do MC, menor a porcentagem de perda de massa. Para os tempos de queima de 1h, 3h e 5h, foram degradados respectivamente, 20%, 14% e 11% do material, ou seja, ao elevar-se o tempo de calcinação, a quantidade de material lignocelulósico no MC diminui.

Vale salientar que as amostras se apresentam com a coloração escura típica de material carbonoso, ainda existente após o tratamento térmico de 300°C.

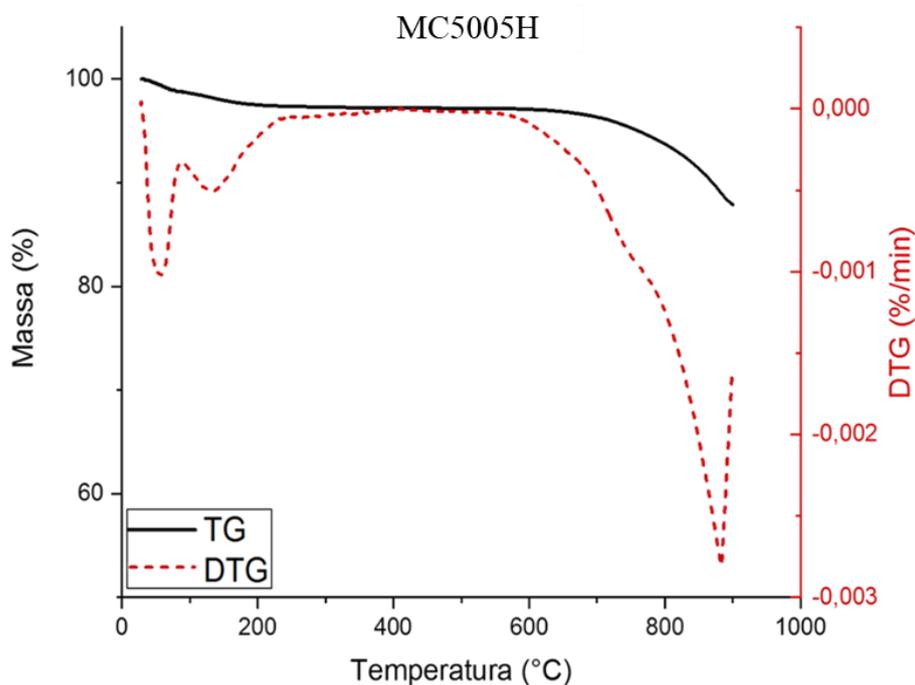
As Figuras 17-19 apresentam as curvas TG/DTG que descrevem a degradação térmica das amostras de MC calcinadas a 500°C.

Figura 17 - Curvas TG/DTG de MC5001H em atmosfera de N₂

Fonte: Autora.

Figura 18 - Curvas TG/DTG de MC5003H em atmosfera de N₂

Fonte: Autora.

Figura 19 - Curvas TG/DTG de MC5005H em atmosfera de N₂

Fonte: Autora.

É visto que, nas amostras produzidas a 500°C, dois eventos de perda de massa ocorrem em temperaturas inferiores a 300°C. Esses eventos podem estar associados à hidroxila ligada ao silício, mostrando-se concordantes com os resultados das análises FTIR.

Nessa faixa de temperatura inferior a 300°C, a amostra calcinada por um período de 1h indicou uma perda de massa próxima a 7%, e as amostras calcinadas por 3h e 5h apresentaram os valores de 4,5% e 2,6%, respectivamente.

Além do mais, na faixa de temperatura situada entre 400-700°C, observa-se o desaparecimento das frações correspondentes à celulose e à hemicelulose, restando a fração de lignina, que é mais estável e degrada-se em temperatura superior. Dessa forma, ainda se tem material carbonoso residual.

A Tabela 9 apresenta os resultados da análise TG/DTG para as amostras FC, MC3001H, MC3003H, MC3005H, MC5001H, MC5003H e MC5005H.

Tabela 9 – Resultados de perda de massa das análises TG/DTG para as amostras FC e MC

Material	Código da Amostra	Intervalos Curva TG (°C)	Perda de Massa Curva TG (%)	Temp. Curva DTG (°C)
Fibras do mesocarpo do coco verde <i>in natura</i>	FC	0 - 125	9,076	56,85
		125 - 400	50,376	319,81
		400 - 900	31,193	-
Material carbonoso das fibras do mesocarpo do coco verde	MC3001H	0 - 120	2,361	47,56
		120 - 315	0,979	157,58
		315 - 600	16,101	498,9
		600 - 900	8,184	-
Material carbonoso das fibras do mesocarpo do coco verde	MC3003H	0 - 75	0,184	35,7
		75 - 225	1,549	151,66
		225 - 700	13,036	532,35
		700 - 900	7,775	-
Material carbonoso das fibras do mesocarpo do coco verde	MC3005H	0 - 100	0,541	60,77
		100 - 240	2,172	154,69
		240 - 575	4,445	532,03
		575 - 900	10,875	604,2
Material carbonoso das fibras do mesocarpo do coco verde	MC5001H	0 - 100	3,81	64,26
		100 - 280	3,407	143,53
		280 - 900	8,664	663,99
Material carbonoso das fibras do mesocarpo do coco verde	MC5003H	0 - 90	2,882	51,29
		90 - 290	1,648	122,8
		290 - 900	6,152	-
Material carbonoso das fibras do mesocarpo do coco verde	MC5005H	0 - 90	1,204	58,35
		90 - 375	1,514	135,39
		375 - 750	1,858	670,74
		750 - 900	4,067	-

Fonte: Autora.

4.4 Caracterização do efluente do biodiesel

Este tópico apresenta os resultados obtidos nas etapas de caracterização do efluente de biodiesel E0: estudos quantitativos (avaliação de parâmetros) e estudos qualitativos (aplicação dos MC em E0).

4.4.1 Análises quantitativas

As análises quantitativas dos parâmetros Turbidez, Cor, OD, OG e DQO da amostra de E0 possibilitaram maior conhecimento a respeito das características dos contaminantes presentes, bem como concentrações de poluentes.

Os subtópicos seguintes apresentam os resultados relativos às análises, e com base neles, discutem a condução do estudo.

4.4.1.1 Turbidez

Para a análise do parâmetro Turbidez, houve a necessidade de diluição da amostra bruta para a leitura no turbidímetro. Assim, 0,5 mL de efluente foi diluído em água deionizada em um balão volumétrico de 25 mL, reduzindo-se as concentrações em 50 vezes.

A necessidade de diluição já indica valores altos para o parâmetro, que foi confirmado com a obtenção do valor final de 19650 UNT. Apesar da resolução nacional não definir um limite específico para esse parâmetro, verifica-se que o valor encontrado confirma uma turbidez elevada, já notada por meio do aspecto visual do efluente.

4.4.1.2 Cor

Para realizar a análise de Cor, o efluente E0 foi diluído em 200 vezes em água deionizada, sendo adicionado 0,25 mL de amostra em um balão volumétrico de 50 mL.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 357, para descarte de efluentes, o parâmetro “cor verdadeira” deve ser analisado. Para isso, a amostra foi filtrada em filtro de membrana de 0,45 µm e em seguida, foi realizada a leitura em espectrofotômetro. O valor de absorbância encontrado foi de 0,096 e aplicando-o na equação da curva analítica, tem-se:

$$y = 0,003x - 0,0007$$

$$0,105 = 0,0003x - 0,0007$$

$$x = 317,66 \text{ mg.Pt/L}$$

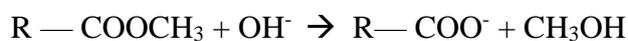
$$\text{Cor verdadeira} = 317,66 \text{ (mg Pt/L)} * 200 = 63533,33 \text{ mg.Pt/L}$$

O valor encontrado para o parâmetro Cor verdadeira no efluente bruto mostra-se muito superior ao limite estabelecido pela resolução nacional, que deve ser inferior a 75 mg Pt/L.

4.4.1.3 Oxigênio dissolvido

Para a análise de OD do efluente E0, foram seguidos todos os passos previstos na metodologia de análise adotada. Após adicionar o H₂SO₄ ao frasco, etapa que antecede a titulação, a metodologia indica a formação de precipitado de coloração castanha, necessário para realização da titulação e conseqüente quantificação do OD.

No entanto, ao adicionar o H₂SO₄, a amostra de efluente não apresentou o precipitado esperado. Isso pode indicar a inexistência de OD, uma vez que a presença de sabões formados por reação de saponificação, comuns nesse tipo de efluente, resulta na captura do oxigênio. Essa característica pode ser explicada pela reação de saponificação de ésteres, onde ocorre a captura de OH⁻ para formação de sal (sabão) e álcool (HÁJEK; SKOPAL, 2010).



Após 24 horas, ocorreu a formação de uma camada oleosa na superfície da amostra. O efluente, por sua vez, passou a apresentar característica incolor, como mostrado pela Figura 20.

Figura 20 - Separação de óleo em E0 após acidificação



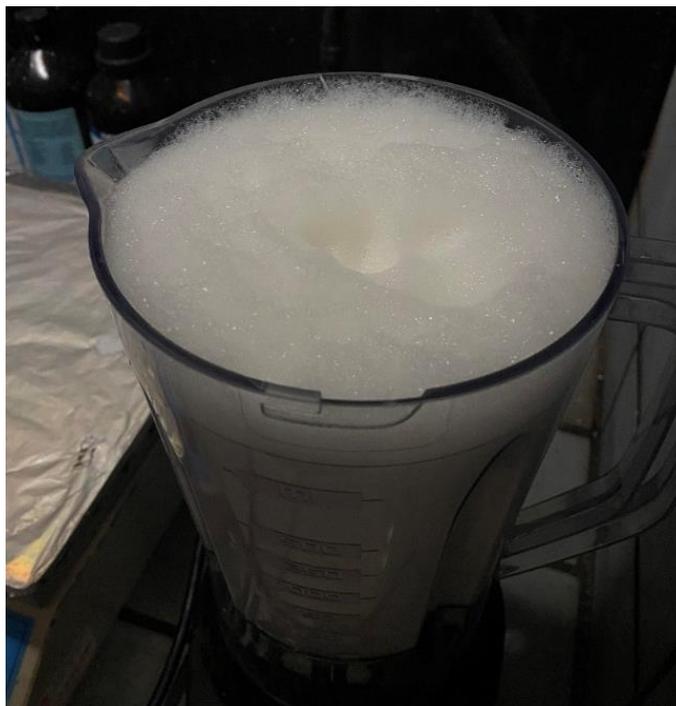
Fonte: Autora.

Portanto, com a separação do óleo da amostra bruta após sua acidificação, verificou-se a possibilidade de aplicar tal resultado como metodologia para um pré-tratamento do efluente, uma vez que, o excesso de óleo impossibilitou o desenvolvimento do tratamento por adsorção.

4.4.1.4 Óleos e graxas

A partir do processo de emulsificação da amostra utilizando um liquidificador, foi notada a formação de grande quantidade espuma, como é possível observar pela Figura 21.

Figura 21 - Espuma formada em E0 após a mistura em liquidificador



Fonte: Autora.

De acordo com Ahmed e Huddersman (2022), quando associados a catalisadores de base homogênea, a água e os ácidos graxos livres não convertidos durante o processo de esterificação, sofrem hidrólise alcalina (saponificação). Essa reação é conhecida por gerar sais de ácidos graxos (sabões) (DIJKSTRA, 2016), o que facilita a formação de uma evidente camada de espuma quando o efluente E0 é submetido a agitação.

Uma vez que a amostra de efluente analisado é oriunda de um processo de produção de biodiesel a partir de óleo de cozinha residual, no qual utiliza-se catalisador alcalino KOH (VIDIGAL, 2021), é esperado que, além da água utilizada para lavagem, existam resíduos de catalisador e ácidos graxos não convertidos.

As análises de OG realizadas indicaram um valor médio da massa de óleo ($m_f - m_i$) igual a 0,1406 g, considerando um volume de amostra de 10 mL. Desta forma, realizando o cálculo, foi possível definir a concentração em mg/L do parâmetro OG no efluente E0.

$$\text{OG (mg/L)} = \frac{(0,1406) \times 10^6}{10} = 14060 \text{ mg/L}$$

O valor obtido é muito superior ao limite estabelecido pela resolução nacional, que considera que a concentração para descarte para esse tipo de efluente deve ser igual ou inferior a 50 mg/L.

4.4.1.5 Demanda química de oxigênio

Inicialmente, identificou-se a necessidade de diluir a amostra bruta em 100 vezes para a preparação da solução utilizada na análise de DQO. Para isso, foram adicionados água deionizada e 0,25mL de efluente em um balão volumétrico de 25 mL.

De acordo com a metodologia, devido as altas concentrações de impurezas presentes no efluente E0, foi adotada a curva analítica de alto teor para a análise de DQO e, desta forma, utilizou-se Dicromato de Potássio 1,0 Eq/L para a preparação da solução.

A análise de DQO da amostra E0 indicou uma alta concentração de matéria orgânica presente, cujo resultado foi de 106817 mg.O₂/L, o que se mostra consonante com o valor do parâmetro OG.

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos nas análises dos parâmetros Temperatura, pH, Condutividade, Turbidez, Cor, OD, OG e DQO da amostra E0 e os compara com os limites estabelecidos pelo CONAMA.

Tabela 10 – Resultados dos parâmetros do efluente E0 comparados aos limites de descarte

Parâmetro	E0	Limite de descarte	Unidade de medida
Temperatura	25	< 40	°C
pH	9,85	6,0 a 9,0	-
Condutividade	827	100 a 1000	µS/cm
Turbidez	19650	-	UNT
Cor verdadeira	70466,7	< 75	mg Pt/L
OD	0	>= 4	mg/mL
OG	14060	≤ 20 (mineral) 50 (vegetal/animal)	mg L ⁻¹
DQO	106817	-	mg O ₂ /L

Fonte: Autora.

Embora as Resoluções CONAMA não definam limites de descarte para os parâmetros Turbidez e DQO, é possível encontrar algumas informações relativas a eles.

A Resolução CONAMA nº 357 afirma que o valor de turbidez não deve ultrapassar o valor de 100 UNT (unidades de turbidez) nos corpos receptores. Desta forma, deve ser realizado um estudo da interação entre o efluente lançado e o corpo receptor, considerando as vazões, concentrações e mistura.

Quanto ao parâmetro DQO, nota-se ausência de limites de descarte nas legislações nacionais adotadas no estudo, sendo possível encontrar especificações apenas para o parâmetro DBO. Assim, o Artigo 16 da Resolução CONAMA nº 430 define que a remoção mínima do parâmetro DBO deve ser de 60% nos efluentes a serem descartados, porém esta não define um limite de concentração para descarte.

Assim, buscou-se especificações em legislações estaduais, inicialmente, as relativas ao estado de São Paulo. Logo, foi possível encontrar limite definido para DBO no Decreto

8468/76 da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente.

Segundo o artigo 18 do Decreto 8468/76 da CETESB:

Art. 18 - Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nas coleções de água, desde que obedeçam às seguintes condições: V - DBO 5 dias, 20°C no máximo de 60 mg/l (sessenta miligramas por litro).

Desta maneira, assim como nas legislações federais, nota-se que não é encontrado limite para o parâmetro DQO em efluentes industriais na legislação do estado de São Paulo. No entanto, é possível encontrar referências em outras legislações estaduais como a diretriz de controle de carga orgânica em efluentes líquidos de origem industrial (DZ 205.R-6) do estado do Rio de Janeiro, que define limites máximos para DQO conforme o tipo de indústria e variam entre 100 e 500 mg O₂/L.

Como o presente estudo visa o tratamento e caracterização de efluente de origem industrial, considerou-se o limite de descarte máximo (500 mg O₂/L) para o parâmetro DQO apresentado pela DZ 205.R-6 do estado do Rio de Janeiro. Cabe ressaltar que o limite adotado foi definido apenas com o objetivo de avaliar os resultados do estudo e que em caso concreto os limites de descarte deverão ser obedecidos conforme as exigências definidas pelo órgão ambiental competente em processo de licenciamento (BRASIL, 2005).

4.4.2 Aplicação dos MC no efluente E0

Este tópico apresenta os resultados referentes ao estudo qualitativo do efluente E0, desenvolvido a partir da aplicação do material carbonoso como adsorvente em concentrações 1% e 5%. Nesta etapa, visando otimizar tempo e material (fibras de coco) gastos na produção do adsorvente, optou-se pelo uso da amostra MC3001H.

4.4.2.1 Concentração 1%

Para a realização do ensaio de adsorção em concentração de 1% foram utilizados 0,75g de material carbonoso produzido a 300°C por 1h (MC3001H) e 75 mL de efluente bruto.

Os experimentos foram realizados conforme os períodos pré-estabelecidos para cada amostra, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11 - Tempos de agitação dos experimentos de adsorção em E0

Amostra	Tempo de agitação
A1	15 min
A2	30 min
A3	60 min
A4	90 min
A5	120 min
A6	240 min
A7	360 min
A8	1440 min

Fonte: Autora.

Realizados os experimentos de adsorção, as amostras foram filtradas com o auxílio de bomba de vácuo e os filtrados obtidos são apresentados na Figura 22, onde é possível observar o aspecto turvo e coloração castanha em todos eles, variando apenas em suas tonalidades.

Figura 22 - Filtrados obtidos após adsorção em concentração 1%



Fonte: Autora.

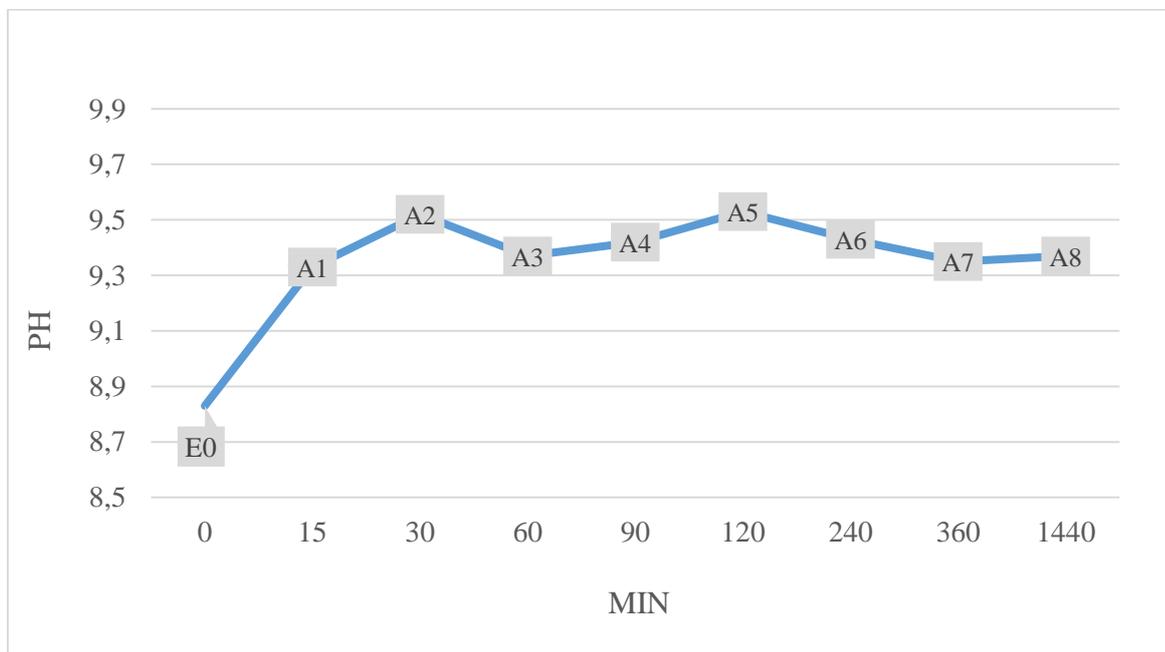
Em seguida, foi analisada a influência da variável “tempo de agitação” em função do parâmetro pH. A Tabela 12 e a Figura 23 indicam as variações nos valores de pH das amostras 1 a 8.

Tabela 12 - Experimentos de adsorção em E0 (MC3001H 1%)

Amostra	Concentração	Tempo de agitação	pH
A1	1%	15 min	9,33
A2	1%	30 min	9,52
A3	1%	60 min	9,37
A4	1%	90 min	9,42
A5	1%	120 min	9,53
A6	1%	240 min	9,43
A7	1%	360 min	9,35
A8	1%	1440 min	9,37

Fonte: Autora.

Figura 23 - Curva do pH em função do tempo de agitação



Fonte: Autora.

Ao analisar a curva do parâmetro pH em função do tempo de agitação, identifica-se, no primeiro momento, uma elevação devido à presença do adsorvente, visto que E0 possui pH 8,83.

No entanto, nota-se que a curva apresenta uma instabilidade, não seguindo um perfil definido ao longo do tempo de agitação. Isso pode estar associado ao excesso de óleo nas amostras, uma vez que o parâmetro pH refere-se à concentração de íons H^+ em um meio aquoso, podendo não se mostrar, desta forma, bem definido em soluções que não sejam aquosas ou semelhantes (GLAB; MAJ-SURAWSKA; HULANICKI, 2013).

4.4.2.2 Concentração 5%

Para a realização do ensaio de adsorção em concentração de 5% foram utilizados 2,5g de material carbonoso a 500°C por 1h (MC5001H) e 50mL de E0.

As amostras líquidas, filtradas a vácuo, são apresentadas na Figura 24 e é visto que todas apresentaram coloração castanha, variando entre tonalidades mais claras e escuras.

Figura 24 - Filtrados obtidos após adsorção em concentração 5%



Fonte: Autora.

Em seguida, foram obtidos os valores relativos ao parâmetro pH de cada amostra líquida filtrada. A Tabela 13 e a Figura 25 indicam as variações nos valores de pH das amostras 1 a 8 em função da variável “tempo de agitação”.

Tabela 13 - Experimentos de adsorção em E0 (MC5001H 5%)

Amostra	Concentração	Tempo de agitação	pH
B1	5%	15 min	9,83
B2	5%	30 min	9,76
B3	5%	60 min	10,09
B4	5%	90 min	10,04
B5	5%	120 min	9,43
B6	5%	240 min	9,09
B7	5%	360 min	9,36
B8	5%	1440 min	9,7

Fonte: Autora.

Figura 25 - Curva do pH em função do tempo de agitação



Fonte: Autora.

Assim como a curva de pH apresentada no tópico 4.4.2.1 (concentração 1%), em concentração 5%, o parâmetro pH em função do tempo de agitação elevou-se em presença

de adsorvente, aumentando de 8,83 (amostra E0) para 9,83 (amostra B1). Em seguida, é possível notar um desequilíbrio ainda maior do sistema comparado à concentração mais baixa.

Mediante esses resultados, verificou-se necessidade de desenvolver etapas de pré-tratamento para o efluente, visto que o excesso de óleo presente na amostra bruta inviabilizou a proposta de tratamento com o adsorvente MC.

4.5 Pré-tratamento do efluente E0

Este tópico expõe os resultados obtidos a partir da realização das três etapas de pré-tratamento do efluente de biodiesel: Acidificação e Separação; Filtração Simples e Neutralização de pH.

4.5.1 Etapa 1 (Acidificação e Separação)

A primeira etapa do pré-tratamento, realizada através da adição de HCl na amostra E0, mostrou-se eficiente na separação do óleo presente na amostra.

Logo após a acidificação, a amostra foi colocada em um funil de separação tipo pera, e em aproximadamente 5 min, tornou-se possível observar a formação de uma pequena camada de óleo na superfície do líquido e após 24h, as duas fases (óleo e líquido) tornaram-se bem definidas, conforme mostra a Figura 26.

Figura 26 - Separação do óleo da amostra E0 após acidificação



Fonte: Autora.

Assim, a etapa 1 do pré-tratamento promoveu a obtenção da amostra E1, utilizando um funil de separação (Figura 26) e as características visuais de ambos podem ser observadas na Figura 27.

Figura 27 - Amostra E1 e óleo após separação



Fonte: Autora.

Além disso, foi visto que, nesta etapa, cerca de 8 mL de óleo puderam ser removidos de 350 mL de amostra E0, o que equivale a aproximadamente 2,3%.

Entretanto, foi notada a presença de óleo na superfície da amostra E1, como pode ser visto na Figura 28, indicando a necessidade de uma segunda etapa de pré-tratamento.

Figura 28 - Óleo residual presente na superfície da amostra E1 após a etapa 1 do pré-tratamento

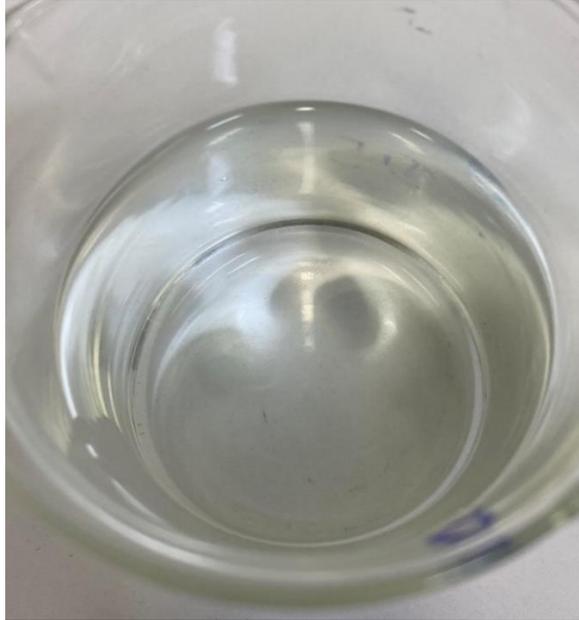


Fonte: Autora.

4.5.2 Etapa 2 (Filtração Simples)

Na etapa 2 do pré-tratamento, buscou-se remover o óleo residual presente na amostra E1 por meio de filtração simples, utilizando um funil analítico com papel como elemento filtrante. Esta etapa possibilitou a remoção completa da fase oleosa visível, como mostra a Figura 29.

Figura 29 - Amostra E2 obtida após filtração



Fonte: Autora.

4.6 Caracterização das etapas de pré-tratamento

A Tabela 14 compara os valores obtidos pelas análises quantitativas realizadas em cada etapa do pré-tratamento (amostras E1 e E2) com a amostra E0, usando como referência, os limites de descarte estabelecidos pelo CONAMA.

Tabela 14 - Resultados dos parâmetros das amostras de efluente bruto (E0) e pré-tratadas (E1 e E2) comparados aos limites de descarte

Parâmetro	E0	E1	E2	Limite de descarte	Unidade
Temp.	25	25,1	24,3	< 40	°C
pH	9,85	1,39	1,6	6,0 a 9,0	-
Cond.	827	31000	35200	100 a 1000	µS/cm
Turbidez	19650	12,1	0,26	-	UNT
Cor Verdadeira	70466,7	829	72,3	< 75	mg Pt/L
OD	0	0	0	>= 4	mg/mL
OG	14060	156	76	≤ 20 (mineral) ≤ 50 (vegetal/animal)	mg/L
DQO	106817	61296	55295	-	mg.O ₂ /L

Fonte: Autora.

Ao analisar os dados, verifica-se que, em todas as amostras, o parâmetro Temperatura se encontra próximo à temperatura ambiente e conseqüentemente, enquadrado ao limite estabelecido em norma.

Apesar da resolução nacional não determinar um limite específico para o parâmetro Turbidez, nota-se que a amostra E0 apresenta um valor muito elevado. Contudo, as etapas 1 e 2 do pré-tratamento foram responsáveis por uma redução de aproximadamente 75.500 vezes, o que confirma a alta eficiência e importância da remoção da fração oleosa.

Situação semelhante ao que ocorre com o parâmetro Turbidez também é vista no parâmetro Cor Verdadeira. A amostra E0 apresenta um valor muito superior ao limite de descarte considerado, que deve ser menor que 75 mg Pt/L. Porém, logo na primeira etapa do pré-tratamento, é vista uma redução significativa, onde o valor é reduzido cerca de 85 vezes. A remoção do óleo residual (etapa 2) reduziu ainda mais o valor, possibilitando o enquadramento do parâmetro na amostra E2 (72,3 mg Pt/L).

O parâmetro OG possui dois diferentes limites máximos para descarte que se diferem em relação a origem do material. No caso do presente estudo, o efluente é gerado durante a produção de biodiesel a partir de resíduos de óleo de cozinha. Assim, considera-se o valor de limite ≤ 50 mg/L, por ser um óleo de origem vegetal com possíveis resíduos alimentícios. Com isso, verifica-se que a amostra E0 apresenta uma concentração de OG muito superior ao limite máximo de descarte, devido ao processo de lavagem de biodiesel. Com a realização do pré-tratamento, é notada, logo na etapa 1, uma redução em cerca de 90 vezes na concentração de OG, obtendo-se o valor de aproximadamente 156 mg/L na amostra E1. A amostra E2 apresentou concentração de 76 mg/L, que apesar da redução significativa, ainda se encontra acima do padrão definido pela norma.

Quanto ao parâmetro Condutividade, é visto que a amostra E0 se encontra dentro da norma. Entretanto, como o pré-tratamento removeu uma grande quantidade de material orgânico, elevou-se a proporção de água na solução, ocorrendo o isolamento de íons dos compostos presentes. De acordo com Russel (1994), compostos se ionizam em soluções aquosas devido à alta constante dielétrica da água. Assim, a alta concentração de íons acarretou uma considerável elevação nos valores de condutividade nas amostras E1 e E2, ultrapassando o limite máximo definido para o descarte.

Ao analisar o parâmetro pH, é visto que a amostra E0 se apresentou acima do limite máximo de descarte, e que após a adição do ácido na etapa 1, reduziu-se à uma faixa abaixo do limite mínimo. Contudo, a etapa seguinte do estudo envolve o ajuste de pH para realização dos ensaios de adsorção.

No que diz respeito ao parâmetro OD, é importante destacar que as legislações vigentes (nacional e estaduais) não definem um valor mínimo de concentração do efluente lançado, mas apenas do corpo d'água receptor.

Logo, conforme cita a Resolução CONAMA nº 357, não havendo disposição em norma específica, cabe aos órgãos ambientais estabelecerem, no processo de licenciamento, a carga limite de poluentes para a liberação de substâncias que podem estar presentes ou serem formadas nos processos produtivos, além disso, em empreendimentos com significativo impacto ambiental, deverá ser realizado um estudo de capacidade de suporte de carga do corpo de água receptor. No caso do presente estudo, como não há aplicação em um caso concreto, considerou-se as condições de qualidade de água exigidas na mesma

Resolução para os corpos receptores (classe 3), sendo o valor mínimo para o parâmetro de 4 mg/L.

Com isso, nota-se que o teor de OD se mostrou praticamente ausente em todas as amostras, ou seja, abaixo do limite mínimo adotado pelo estudo. De acordo com Ribeiro e Botari (2022), compostos como os óleos e graxas ao serem degradados reduzem o oxigênio dissolvido e elevam a DBO e DQO das águas. Desta forma, a ausência de OD nas amostras pode indicar que a alta concentração de espécies orgânicas oleosas no efluente coletado (E0) foi responsável pelo consumo do oxigênio.

Por fim, a DQO mostrou uma redução considerável ao longo das etapas. A etapa 1 do pré-tratamento foi responsável por uma redução de aproximadamente 43% em seu valor, enquanto a etapa 2 reduziu 9,8%. Contudo, é visto que o valor de 55295 mg O₂/L obtido após as etapas do pré-tratamento, ainda é muito elevado.

4.7 Ensaios de adsorção e caracterização

Após a realização dos experimentos de adsorção e dos procedimentos adotados na metodologia do estudo e descritos no tópico 3.4.8, foi realizada a análise de DQO dos filtrados obtidos por se tratar de uma metodologia mais rápida e que requer pouco volume de efluente. Os resultados apresentados nos tópicos 4.7.1 e 4.7.2 delinearão o estudo, definindo as melhores condições de concentração, pH e tempo de agitação.

4.7.1 Concentração x pH

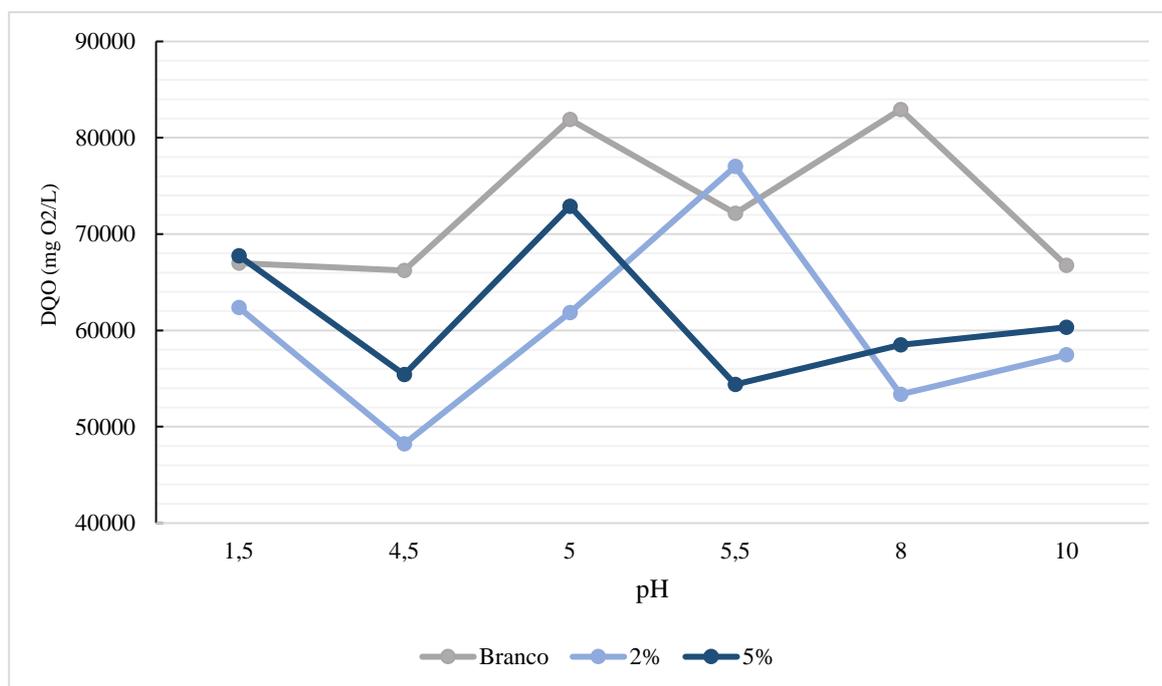
Uma vez realizados os primeiros experimentos, foi avaliada a influência das variáveis “concentração de adsorvente” e “pH da mistura” no processo de adsorção. Tal avaliação se deu por meio dos valores de concentração do parâmetro DQO, obtidos em mgO₂/L. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 15 e na Figura 30.

Tabela 15 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção “Concentração x pH”

pH	Branco	MC3001H	
		2%	5%
1,5	66995	62365	67762
4,5	66223	48218	55420
5	81913	61850	72900
5,5	72160	77026	54391
8	82942	53363	58507
10	66738	57478	60308

Fonte: Autora.

Figura 30 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Concentração x pH"



Fonte: Autora.

Ao analisar os dados gerados nota-se que não houve significativas reduções do parâmetro DQO após exposição ao adsorvente. No entanto, quando os valores obtidos são comparados, é possível destacar que a maior redução se deu em concentração de 2% e pH

4,5, condição que possibilitou o alcance do valor de 48218 mg O₂/L, destacado na Tabela 15.

Com base nesse resultado e visando trabalhar com a menor quantidade possível de MC, o parâmetro concentração foi fixado em 2%. Quanto ao parâmetro pH, optou-se em manter os valores de 1,5 e 4,5 para um melhor estudo de adsorção em faixa ácida.

4.7.2 Tempo de agitação

Em um segundo momento, avaliou-se o parâmetro “tempo” e para isso, o parâmetro DQO das amostras oriundas dos experimentos de adsorção foi analisado. Os resultados obtidos, em mgO₂/L, encontram-se na

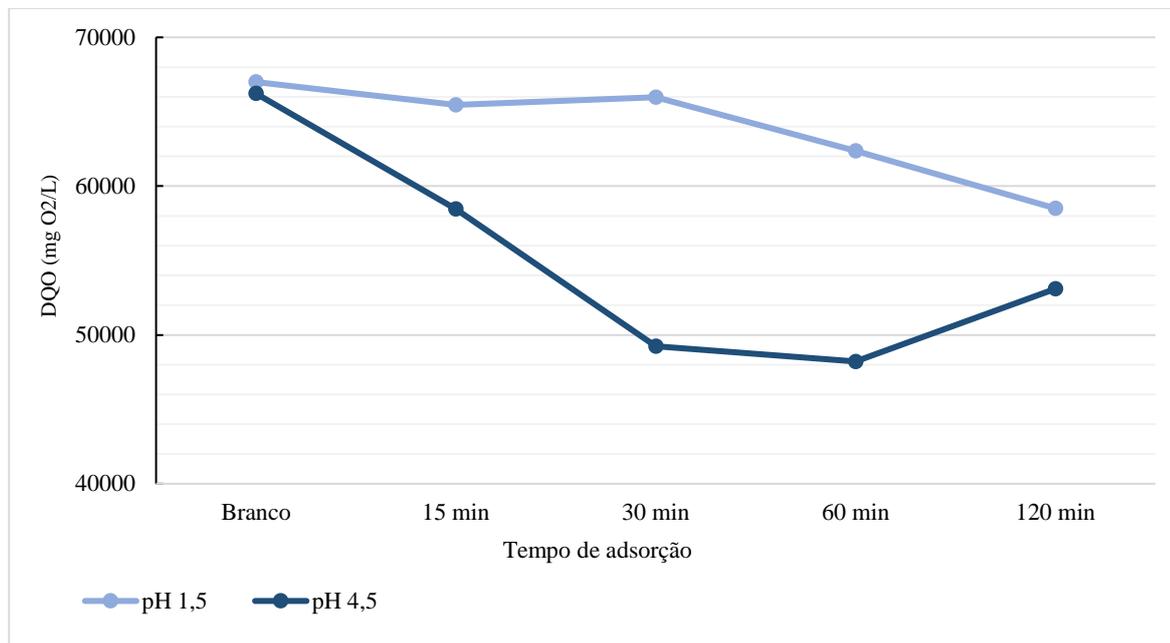
Tabela 16 e na Figura 31.

Tabela 16 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Tempo de agitação"

Tempo	pH	
	1,5	4,5
Branco	66995	66223
15 min	65451	58461
30 min	65966	49247
60 min	62365	48218
120 min	58506	53100

Fonte: Autora.

Figura 31 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Tempo de agitação"



Fonte: Autora.

Observando os resultados, percebe-se que o pH 4,5 proporcionou as melhores condições para adsorção dos contaminantes, visto que ocorreram reduções mais evidentes entre 30 e 60 minutos. Tal resultado converge com a análise realizada anteriormente, reforçando que o melhor pH para desenvolvimento do estudo é igual a 4,5. Logo, os parâmetros pH e tempo foram fixados em 4,5 e 60 min, respectivamente.

No entanto, cabe ressaltar que as reduções de DQO apresentadas pelos experimentos deste tópico também se mostraram pouco significativas, visto que ainda indicam altos valores de contaminantes presentes no efluente.

4.7.3 Adsorção com MC

Por fim, após realizar ensaios de adsorção para cada uma das seis amostras de MC produzidas, foram analisadas as concentrações de DQO das amostras.

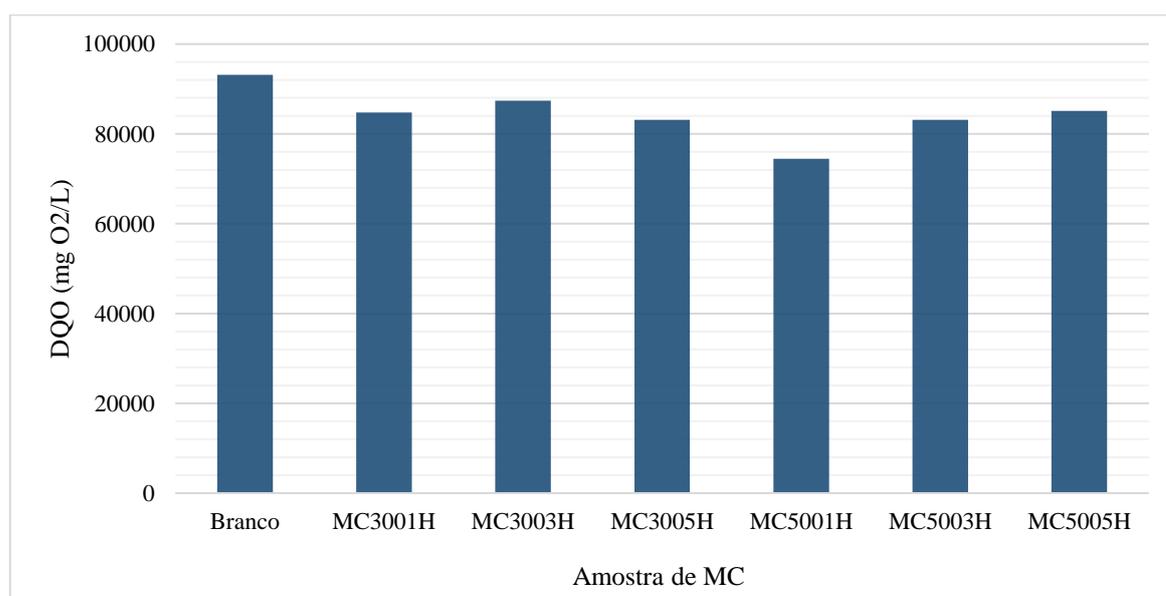
Vale destacar que foram reproduzidos cinco experimentos para cada amostra de MC, contudo, para conferir maior precisão aos resultados, foram descartados dois valores de cada amostra, de modo a obter triplicatas. Em seguida, calculou-se a média de cada triplicata e seu respectivo desvio-padrão. Os resultados encontram-se na Tabela 17 e pela Figura 32.

Tabela 17 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Material Carbonoso"

Amostra	DQO (mg O ₂ /L)	Eficiência de redução (%)
	Média ± Dp	
Branco	93144,50 ± 641,7	-
MC3001H	84740,75 ± 362,6	9,02
MC3003H	87400,35 ± 606,1	6,17
MC3005H	83113,25 ± 641,7	10,77
MC5001H	74453,70 ± 727,4	20,06
MC5003H	83153,70 ± 955,2	10,73
MC5005H	85085,50 ± 848,9	8,65

Fonte: Autora.

Figura 32 - Resultados de concentrações de DQO das amostras obtidas pelos experimentos de adsorção "Material Carbonoso"



Fonte: Autora.

Ao observar os dados gerados com base nesses experimentos, nota-se que a amostra tratada com MC5001H apresentou o melhor resultado de eficiência de redução do parâmetro

DQO, o que está concordante com o resultado de TG relativo ao primeiro evento de perda de massa, que foi atribuído ao hidróxido de silício presente na amostra. Porém, quando são observadas as dimensões do gráfico, é visto que as médias de DQO calculadas são consideravelmente elevadas, pois mesmo não havendo especificações de descarte expressas em norma, definiu-se para fins comparativos, um limite máximo 500 mg O₂/L para este parâmetro com base na DZ 205.R-6.

Desta maneira, infere-se que mesmo após a realização do pré-tratamento e do tratamento via adsorção, o efluente de biodiesel ainda indicou altos teores de contaminantes orgânicos, uma vez que o parâmetro DQO analisado nesta etapa representa a quantidade de matéria orgânica presente quimicamente degradável.

5 Conclusões

Pelas análises de TG/DTG realizadas no material carbonoso, observou-se que os eventos térmicos acontecem até 600°C. Portanto, optou-se pela geração de materiais calcinados em 300°C e 500 °C.

A etapa de caracterização das amostras de MC (MC3001H, MC3003H, MC3005H, MC5001H, MC5003H e MC3005H) indicou baixas concentrações de SiO₂, o que foi determinante no processo de adsorção realizado.

O efluente bruto (E0) apresentou cerca de 2,3% de matéria orgânica passível de remoção, necessitando fazer sua purificação prévia por acidificação.

Nas amostras de efluente tratado (E1 e E2), o valor de DQO ainda foi elevado.

Os resultados relativos ao processo de adsorção nas amostras estudadas mostraram altas concentrações de DQO, indicando baixa eficiência de remoção da matéria poluente existente no efluente de biodiesel.

Estudos de adsorção indicaram que o material MC5001H apresentou maior eficiência de redução do parâmetro DQO.

REFERÊNCIAS

ABDUL KHALIL, H. P. S.; SITI ALWANI, M.; MOHD OMAR, A. K. Chemical composition, anatomy, lignin, distributivo, and cell wall structure of malaysian plant waste fibers. **BioResources**, [S.l.], v.1, n.2, p. 220-232, Nov. 2006. Disponível em: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/chemical-composition-anatomy-lignin-distribution-and-cell-wall-structure-of-malaysian-plant-waste-fibers/>. Acesso em: 14 abr. 2021.

AHMED, R.; HUDDERSMAN, K. Review of biodiesel production by the esterification of wastewater containing fats oils and grease (FOGs). **Journal Of Industrial And Engineering Chemistry**, [S.l.], v. 110, p. 1-14, Jun. 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2022.02.045>.

AKTAR, M. S.; SHAKIL, M. S. R.; TUJ-ZOHRA, F. Potentials of bio-adsorbent prepared from coconut fibre in mitigation of pollution from tanning effluent. **Cleaner Engineering And Technology**, [S.l.], v. 17, p. 1-9, Dec. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.clet.2023.100687>.

ALAN, H.; KÖKER, A. R. Analyzing and mapping agricultural waste recycling research: an integrative review for conceptual framework and future directions. **Resources Policy**, [S.l.], v. 85, p. 1-19, Aug. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103987>.

AMBAT, I.; SRIVASTAVA, V.; SILLANPÄÄ, M. Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 90, p. 356-369, July 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.069>.

ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R. A.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. S. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, [S.l.], v. 28, n. 5, p. 707-714, Oct. 2004. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-67622004000500010>.

ANUAR, M. F.; FEN, Y. W.; ZAID, M. H. M.; MATORI, K. A.; KHAIDIR, R. E. M. Synthesis and structural properties of coconut husk as potential silica source. **Results In Physics**, [S.l.], v. 11, p. 1-4, Dec. 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2018.08.018>.

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington: American Public Health Association; American Water Works Association and Water Environmental Federation, 1998.

ARAGÃO, W. M.; ISBERNER, I. V.; CRUZ, E. M. O. Água de coco. Documentos 24. Aracaju: **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, 2001. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/370873/1/CPATCDOC.2401.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2021.

ARAÚJO, R. F.; BEZERRA, L. C. A.; NOVAIS, L. M. R.; D'OCA, C. R. M.; AVELINO, F. Unveiling the mechanistic aspects of methylene blue adsorption onto a novel phosphate-

decorated coconut fiber lignin. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.l.], v. 253, p. 1-15, Dec. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127011>.

AWOGBEMI, O.; VON KALLON, D. V. Progress in agricultural waste derived biochar as adsorbents for wastewater treatment. **Applied Surface Science Advances**, [S.l.], v. 18, p. 1-18, Dec. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100518>.

AZARI, A.; NABIZADEH, R.; NASSERI, S.; MAHVI, A. H.; MESDAGHINIA, A. R. Comprehensive systematic review and meta-analysis of dyes adsorption by carbon-based adsorbent materials: classification and analysis of last decade studies. **Chemosphere**, [S.l.], v. 250, p. 1-18, July 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126238>.

BAHARUM, N. A.; NASIR, H. M.; ISHAK, M. Y.; ISA, N. M.; HASSAN, M. Ali; ARIS, A. Z. Highly efficient removal of diazinon pesticide from aqueous solutions by using coconut shell-modified biochar. **Arabian Journal Of Chemistry**, [S.l.], v. 13, n. 7, p. 6106-6121, July 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2020.05.011>.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. Porto Alegre: Grupo A, 2011. ISBN 9788577808519. *E-book*. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577808519/>. Acesso em: 18 dez. 2023.

BANERJEE, P. K. Environmental textiles from jute and coir. *In*: KOZŁOWSKI, R. M.; MACKIEWICZ-TALARCZYK, M. **Handbook of Natural Fibres: Processing and applications**. 2. ed. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2020. v. 2, cap. 19, p. 621 - 649. ISBN 978-0-12-818782-1.

BENJAMIN, M. M.; LAWLER, D. F. **Water quality engineering: physical/chemical treatment processes**. Hoboken: Wiley, 2013. 907 p. ISBN 9781118632277.

BISPO, M. D.; SCHNEIDER, J. K.; OLIVEIRA, D. S.; TOMASINI, D.; MACIEL, G. P. S.; SCHENA, T.; ONOREVOLI, B.; BJERK, T. R.; JACQUES, R. A.; KRAUSE, L. C. Production of activated biochar from coconut fiber for the removal of organic compounds from phenolic. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 2743-2750, Apr. 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.029>.

BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. Produção de coco: o Nordeste é destaque nacional. Caderno Setorial ETENE. n.61, ano 3. Fortaleza: **Banco do Nordeste do Brasil**, dez. 2018. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/documents/80223/4296541/61_coco.pdf/c172dd8f-3044-f1db-5d0c-a94c5eb735e0. Acesso em: 11 abr. 2021.

BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. Coco: produção e mercado. Caderno Setorial ETENE. n.206, ano 6. Fortaleza: **Banco do Nordeste do Brasil**, dez. 2021. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1043>. Acesso em: 15 dez. 2023.

BRASIL. **Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005**. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. [S.l.], 13 jan. 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. 2019. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2021**: Nota técnica, Brasil, p. 1-77, Ago. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-688/NT-EPE-DPG-SDB-202202_Analise_de_Conjuntura_do_s_Biocombustiveis_2021.pdf. Acesso em: 16 jan. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005**. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do território nacional. [S.l.], 17 mar. 2005.

BRASIL. **Resolução n° 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. [S.l.], 13 mai. 2011.

BRITO, J. F.; FERREIRA, L. O.; SILVA, J. P.; RAMALHO, T. C. Tratamento da água de purificação do biodiesel utilizando eletrofloculação. **Química Nova**, [S.l.], v. 35, n. 4, p. 728-732, jan. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/ftJZqNBVsQfPFTTXzcZyTKQ/?format=pdf>. Acesso em: 16 jan. 2024.

BUSHRA, R.; MOHAMAD, S.; ALIAS, Y.; JIN, Y.; AHMAD, M. Current approaches and methodologies to explore the perceptible adsorption mechanism of dyes on low-cost agricultural waste: a review. **Microporous And Mesoporous Materials**, [S.l.], v. 319, p. 1-29, May 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111040>

CABRAL, M. M. S.; ABUD, A. K. S.; ROCHA, M. S. R. S.; ALMEIDA, R. M. R. G.; GOMES, M. A. Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos. **Engevista**, [S.l.], v. 19, n. 1, p. 99, Jan. 2017. Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação - UFF. DOI <http://dx.doi.org/10.22409/engevista.v19i1.802>.

CAI, J.; LI, Y.; WANG, H.; MA, C.; LUO, J.; ZHANG, P. Energy selective X-ray diffraction: a novel method to obtain phase information of material in a vial. **Ndt & e International**, [S.l.], v. 121, p. 1-7, July 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102461>.

CARDOSO, C. K. M.; MATTEDI, S.; LOBATO, A. K. C. L.; MOREIRA, I. T. A. Remediation of petroleum contaminated saline water using value-added adsorbents derived from waste coconut fibres. **Chemosphere**, [S.l.], v. 279, p. 1-11, Sep. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130562>.

CATARINO, M.; FERREIRA, E.; DIAS, A. P. S.; GOMES, J. Dry washing biodiesel purification using fumed silica sorbent. **Chemical Engineering Journal**, [S.l.], v. 386, p. 1-11, Apr. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2019.123930>.

CHAGAS NETO, F.; STEFANUTTI, R.; ARAÚJO F. J. F.; CRUZ, L. M. O. Possíveis formas de aproveitamento dos resíduos oriundos do coco (*Cocos nucifera* L.). In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE**, Bento Gonçalves, RS, abr. 2010. Disponível em: https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=119&ano=_segundo. Acesso em: 24 abr. 2021.

CHAI, W. S.; CHEUN, J. Y.; KUMAR, P. S.; MUBASHIR, M.; MAJEED, Z.; BANAT, F.; HO, S.; SHOW, P. L. A review on conventional and novel materials towards heavy metal adsorption in wastewater treatment application. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 296, p. 1-16, May 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126589>.

CHARITHA, V.; ATHIRA, V.s.; JITTIN, V.; BAHURUDEEN, A.; NANTHAGOPALAN, P. Use of different agro-waste ashes in concrete for effective upcycling of locally available resources. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 285, p. 1-17, May 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122851>.

CHEN, Y.; GUO, R.; LI, Y.; LIU, H.; ZHAN, T. L. A degradation model for high kitchen waste content municipal solid waste. **Waste Management**, [S.l.], v. 58, p. 376-385, Dec. 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.005>.

CHEN, S.; XIA, Y.; ZHANG, B.; CHEN, H.; CHEN, G.; TANG, S. Disassembly of lignocellulose into cellulose, hemicellulose, and lignin for preparation of porous carbon materials with enhanced performances. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.l.], v. 408, p. 1-16, Apr. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124956>.

CHEN, Ji; WU, Liudan; HAO, Lili; YU, Xiao; STREIMIKIENE, Dalia. Does the import of green products encourage green technology innovation? Empirical evidence from China. **Technological Forecasting And Social Change**, [S.l.], v. 200, p. 1-16, Mar. 2024. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123137>.

CHEREMISINOFF, Nicholas P. **Handbook of water and wastewater treatment Technologies**. 1. ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001. 576 p. ISBN 9780750674980.

CHONG, C. T.; LOE, T. Y.; WONG, K. Y.; ASHOKKUMAR, V.; LAM, S. S.; CHONG, W. T.; BORRION, A.; TIAN, B.; NG, J. Biodiesel sustainability: the global impact of potential biodiesel production on the energy-water-food nexus. **Environmental Technology & Innovation**, [S.l.], v. 22, p. 1-20, May 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2021.101408>.

CHONG, Z. T.; SOH, L. S.; YONG, W. F. Valorization of agriculture wastes as biosorbents for adsorption of emerging pollutants: modification, remediation and industry application. **Results In Engineering**, [S.l.], v. 17, p. 1-20, Mar. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100960>.

CHOZHAVENDHAN, S.; SINGH, M. Vijay Pradhap; FRANSILA, B.; KUMAR, R. Praveen; DEVI, G. Karthiga. A review on influencing parameters of biodiesel production and purification processes. **Current Research In Green And Sustainable Chemistry**, [S.l.], v. 1-2, p. 1-6, Feb. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.04.002>

CHWASTOWSKI, J.; STAROŃ, P.; KOŁOCZEK, H.; BANACH, M. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions using Canadian peat and coconut fiber. **Journal Of Molecular Liquids**, [S.l.], v. 248, p. 981-989, Dec. 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.152>.

CORRADINI, E.; ROSA, M. F.; MACEDO, B. P; PALADIN P. D.; MATTOSO L. H. C. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de

coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [S.l.], v. 31, n. 3, p. 837-846, Sep. 2009. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-29452009000300030>.

DAUD, N. M.; ABDULLAH, S. R. S.; HASAN, H. A. Response surface methodological analysis for the optimization of acid-catalyzed transesterification biodiesel wastewater pre-treatment using coagulation–flocculation process. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.l.], v. 113, p. 184-192, Jan. 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.10.006>.

DARWIN; THIFAL, M.; ALWI, M.; MURIZAL, Z.; PRATAMA, A.; RIZAL, M. The synthesis of biodiesel from palm oil and waste cooking oil via electrolysis by various electrodes. **Case Studies In Chemical And Environmental Engineering**, [S.l.], v. 8, p. 1-6, Dec. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100512>.

DIJKSTRA, A. Vegetable Oils: Composition and Analysis. In: CABALLERO, B.; FINGLAS, P. M.; TOLDRÁ, F. **Encyclopedia of Food and Health**. Oxford: Academic Press, 2016. p. 357-364. ISBN 978-0-12-384953-3.

EDWARDS, J. D. **Industrial Wastewater Treatment: A Guidebook**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995. 161 p. ISBN 1-56670-112-0.

FAN, C.; HUANG, Y.; LIN, J.; LI, J. Microplastic constituent identification from admixtures by Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy: the use of polyethylene terephthalate (pet), polyethylene (pe), polypropylene (pp), polyvinyl chloride (pvc) and nylon (ny) as the model constituents. **Environmental Technology & Innovation**, [S.l.], v. 23, p. 1-10, Aug. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2021.101798>.

FAOSTAT. World production of the natural foods, coconut production. **Food Agriculture Organization**, [S.l.], 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 22 fev. 2021.

FAREED, A.; ZAIDI, S. B. A.; AHMAD, N.; HAFEEZ, I.; ALI, A.; AHMAD, M. F. Use of agricultural waste ashes in asphalt binder and mixture: a sustainable solution to waste management. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 259, p. 1-16, Oct. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120575>.

FONSECA, J. M.; TELEKEN, J. G.; ALMEIDA, V. C.; SILVA, C. Biodiesel from waste frying oils: methods of production and purification. **Energy Conversion And Management**, [S.l.], v. 184, p. 205-218, Mar. 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.061>.

GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. **Revista ABES**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 76, 2004.

GARG, R.; SABOUNI, R.; AHMADIPOUR, M. From waste to fuel: challenging aspects in sustainable biodiesel production from lignocellulosic biomass feedstocks and role of metal organic framework as innovative heterogeneous catalysts. **Industrial Crops And Products**, [S.l.], v. 206, p. 1-27, Dec. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117554>.

GHOSH, I.; KAR, S.; CHATTERJEE, T.; BAR, N.; DAS, S. K. Adsorptive removal of Safranin-O dye from aqueous medium using coconut coir and its acid-treated forms: adsorption study, scale-up design, mpr and ga-ann modeling. **Sustainable Chemistry And Pharmacy**, [S.l.], v. 19, p. 1-23, Apr. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2021.100374>.

GLAB, S.; MAJ-SURAWSKA, M.; HULANICKI, A. PH. **Reference Module In Chemistry, Molecular Sciences And Chemical Engineering**, [S.l.], p. 72-78, Sep. 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.00401-7>.

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. Silica and its Peculiarities. **Revista Virtual de Química**, [S.l.], v. 10, n. 4, p. 1018-1038, Jul. 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180072>.

HÁJEK, M.; SKOPAL, F. Treatment of glycerol phase formed by biodiesel production. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 101, n. 9, p. 3242-3245, May 2010. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.094>.

HAN, Bing; BUTTERLY, Clayton; ZHANG, Wei; HE, Ji-Zheng; CHEN, Deli. Adsorbent materials for ammonium and ammonia removal: a review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 283, p. 1-19, Feb. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124611>.

HERRERA-FRANCO, P. J.; VALADEZ-GONZÁLEZ, A. Properties of Fiber-Matrix Interfaces of Natural Fiber Composites. In: BRABAZON, D. **Encyclopedia of Materials: composites**. [S.l.]: Elsevier, 2021. v. 3. p. 94-116. ISBN 9780128197318.

HUANG, R.; TENG, Z.; LI, S. Gaussian model analysis and thermal decomposition kinetics of nature fibers. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 357, p. 1-14, July 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131784>.

IANDA, T. F.; PADULA, A. D. Exploring the Brazilian experience to design and simulate the impacts of a biodiesel program for sub-Saharan countries: the case of guinea-bissau. **Energy Strategy Reviews**, [S.l.], v. 32, p. 1-21, Nov. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100547>.

IGHALO, J. O.; CONRADIE, J.; OHORO, C. R.; AMAKU, J. F.; OYEDOTUN, K. O.; MAXAKATO, N. W.; AKPOMIE, K. G.; OKEKE, E. S.; OLISAH, C.; MALLOUM, A. Biochar from coconut residues: an overview of production, properties, and applications. **Industrial Crops And Products**, [S.l.], v. 204, p. 1-18, Nov. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117300>.

INSEEMEESAK, B.; AREEPRASERT, C. Fiber extraction and energy recovery from *Cocos nucifera* Linn mesocarp residues employing steam explosion and anaerobic digestion. **Industrial Crops And Products**, [S.l.], v. 147, p.1-11, May 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112180>.

JAMPÍLEK, J.; KRÁĽOVÁ, K. Preparation of nanocomposites from agricultural waste and their versatile applications. In: ABD-ELSALAM, Kamel A. **Micro and Nano**

Technologies, Multifunctional Hybrid Nanomaterials for Sustainable Agri-Food and Ecosystems, [S.l.]: Elsevier, 2020. Cap. 4. p. 51-98. ISBN 9780128213544. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821354-4.00004-2>.

KdŁdÇARSLAN, M. N.; ARGUN, M. E. Holistic effect of operating conditions and purification methods on the pollution characteristics of washing water and biodiesel quality. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.l.], v. 54, p. 1-14, Aug. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103989>.

KHEDARI, J.; NANKONGNAB, N.; HIRUNLABH, J.; TEEKASAP, S. New low-cost insulation particleboards from mixture of durian peel and coconut coir. **Building And Environment**, [S.l.], v. 39, n. 1, p. 59-65, Jan. 2004. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.08.001>.

KNOTHE, G. Introduction. In: KNOTHE, G.; KRAHL, J.; GERPEN, J. V. **The Biodiesel Handbook**. 2. ed. Urbana, IL: AOCS Press, 2010. cap. 1, p. 1-3. ISBN 978-1-893997-62-2.

KRAMER, D. G.; ROCHA, B. G.; PEREIRA, M. C. S.; SOUZA, R. S. D.; ALVES, C. R.; C. JÚNIOR, G. B.; NASCIMENTO, J. H. O.; QUINA, M. J.; FERREIRA, L. G.; LADCHUMANANANDASIVAM, R. Determination of the Biosorption of Cd(II) by Coconut Fiber. **Journal Of Agricultural Science And Technology B**, [S.l.], v. 4, n. 4, p. 291-298, Apr. 2014. DOI <http://dx.doi.org/10.17265/2161-6264/2014.04b.007>.

KUMAR, G. B. R.; KESAVAN, V. Study of structural properties evaluation on coconut fiber ash mixed concrete. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 22, p. 811-816, 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.158>.

KUMAR, N. S.; BUDDI, T.; LAKSHMI, A. A.; RAJESH, K. V. D. Synthesis and evaluation of mechanical properties for coconut fiber composites - A review, **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], p. 1-6, Feb. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.543>.

LAWAN, I.; ZHOU, W.; GARBA, Z. N.; ZHANG, M.; YUAN, Z.; CHEN, L. Critical insights into the effects of bio-based additives on biodiesels properties. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.l.], v. 102, p. 83-95, Mar. 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.008>.

LI, Z.; YU, C. Adsorption in the treatment of three wastes. In: LI, Zesheng; YU, Changlin. **Nanostructured Materials: hysicochemical chemistry fundamentals for energy and environmental applications**. [S.l.]: Elsevier, 2024. Cap. 17. p. 317-126. ISBN 9780443192562. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-443-19256-2.00013-2>.

LIMA, E. B. C.; SOUSA, C. N. S.; MENESES, L. N.; XIMENES, N. C.; MAIA, P. J. G.; VASCONCELOS, G. S.; PEREIRA, Y. F. S.; MONTEIRO, V. S.; LIMA, N. B. C.; VASCONCELOS, S. M. M. P.1.g.110 Evaluation of oxidative stress of *Cocos nucifera* L. extract on the central nervous system of mice. **European Neuropsychopharmacology**, [S.l.], v. 24, p. 268-269, Oct. 2014. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-977x\(14\)70421-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-977x(14)70421-3).

LOPES, F. C. R.; TANNOUS, K. Coconut fiber pyrolysis: specific heat capacity and enthalpy of reaction through thermogravimetry and differential scanning

calorimetry. **Thermochimica Acta**, [S.l.], v. 707, p. 1-8, Jan. 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2021.179087>.

LOU, J.; BABADI, M. R.; OTADI, M.; TARAHOMI, M.; VAN LE, Q.; KHONAKDAR, H. A.; LI, C. Agricultural waste valorization towards (nano)catalysts for the production of chemicals and materials. **Fuel**, [S.l.], v. 351, p. 1-21, Nov. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128935>.

LUIS-ZARATE, V. H.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, M. C.; ALATRISTE-MONDRAGON, F.; CHAZARO-RUIZ, L. F.; RANGEL-MENDEZ, J. R. Coconut endocarp and mesocarp as both biosorbents of dissolved hydrocarbons in fuel spills and as a power source when exhausted. **Journal Of Environmental Management**, [S.l.], v. 211, p. 103-111, Apr. 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.041>.

MA, Y.; ZHANG, Q.; YIN, Q. Top management team faultlines, green technology innovation and firm financial performance. **Journal Of Environmental Management**, [S.l.], v. 285, p. 1-9, Feb. 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112095>.

MANYANGADZE, M.; CHIKURUWO, N. M. H.; NARSAIAH, T. B.; CHAKRA, C. S.; CHARIS, G.; DANHA, G.; MAMVURA, T. A. Adsorption of lead ions from wastewater using nano silica spheres synthesized on calcium carbonate templates. **Heliyon**, [S.l.], v. 6, n. 11, p. 1-13, Nov. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05309>.

MARAFON A. C.; NUNES M. U. C.; AMARAL, F. C.; SANTOS, J. P. Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Aracaju, SE, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/210127/1/DOC-234.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2021.

MARTINS, C. R.; JESUS JUNIOR, L. A. Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: panorama 2014. Documentos 184. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Aracaju, SE, 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1014433/producao-e-comercializacao-de-coco-no-brasil-frente-ao-comercio-internacional--panorama-2014>. Acesso em: 15 ago. 2021.

MASCHIO, L. J.; PEREIRA, P. H. F.; SILVA, M. L. C. P. Preparation and characterization of cellulose/hydrous niobium oxide hybrid. **Carbohydrate Polymers**, [S.l.], v. 89, n. 3, p. 992-996, July 2012. DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.04.043>.

MELLITI, A.; YdLMAZ, M.; SILLANPÄÄ, M.; HAMROUNI, B.; VURM, R. Low-cost date palm fiber activated carbon for effective and fast heavy metal adsorption from water: characterization, equilibrium, and kinetics studies. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [S.l.], v. 672, p. 1-10, Sep. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131775>.

MILITAO, I. M.; RODDICK, F. A.; BERGAMASCO, R.; FAN, L. Removing PFAS from aquatic systems using natural and renewable material-based adsorbents: a review. **Journal**

Of Environmental Chemical Engineering, [S.l.], v. 9, n. 4, p. 1-15, Aug. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2021.105271>.

MISHRA, L.; BASU, G. Coconut fibre: its structure, properties and applications. In: KOZIOWSKI, R. M.; MACKIEWICZ-TALARCZYK, M. **The Handbook of Natural Fibres**: types, properties and factors affecting breeding and cultivation covers every aspect of natural fibers, their breeding, cultivation, processing and applications. 2. ed. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2020. v. 1. cap. 8. p. 231-255. ISBN 978-0-12-818398-4.

MOFIJUR, M.; SIDDIKI, S. Y. A.; SHUVHO, M. B. A.; DJAVANROODI, F.; FATTAH, I.M. R.; ONG, H. C.; CHOWDHURY, M. A.; MAHLIA, T. M. I. Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources- A mini-review. **Chemosphere**, [S.l.], v. 270, p. 1-14, May 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128642>.

MPATANI, F. M.; HAN, R.; ARYEE, A. A.; KANI, A. N.; LI, Z.; QU, L. Adsorption performance of modified agricultural waste materials for removal of emerging micro-contaminant bisphenol A: a comprehensive review. **Science Of The Total Environment**, [S.l.], v. 780, p. 1-16, Aug. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146629>.

NAYLOR, R. L.; HIGGINS, M. M. The rise in global biodiesel production: implications for food security. **Global Food Security**, [S.l.], v. 16, p. 75-84, Mar. 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.gfs.2017.10.004>.

NGO, D. N. G.; CHUANG, X.; HUANG, C.; HUA, L.; HUANG, C. Compositional characterization of nine agricultural waste biochars: the relations between alkaline metals and cation exchange capacity with ammonium adsorption capability. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 1-11, Jun. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2023.110003>.

NIPA, S. T.; SHEFA, N. R.; PARVIN, S.; KHATUN, M. A.; ALAM, M. J.; CHOWDHURY, S.; KHAN, M. A. R.; SHAWON, S. M. A. Z.; BISWAS, B. K.; RAHMAN, M. W. Adsorption of methylene blue on papaya bark fiber: equilibrium, isotherm and kinetic perspectives. **Results In Engineering**, [S.l.], v. 17, p. 1-9, Mar. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100857>.

NUNES, L. A.; SILVA, M. L. S.; GERBER, J. Z.; KALID, R. A. Waste green coconut shells: diagnosis of the disposal and applications for use in other products. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 255, p. 1-12, Jan. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120169>.

OKUMUŞ, Z. Ç.; DOĞAN, T. H.; TEMUR, H. Removal of water by using cationic resin during biodiesel purification. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 143, p. 47-51, Dec. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.161>.

OYEKUNLE, D. T.; BARASA, M.; GENDY, E. A.; TIONG, S. K. Heterogeneous catalytic transesterification for biodiesel production: feedstock properties, catalysts and process parameters. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.l.], v. 177, p. 844-867, Sep. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.064>.

PACKIALAKSHMI, S.; ANURADHA, B.; NAGAMANI, K.; DEVI, J. S.; SUJATHA, S. Treatment of industrial wastewater using coconut shell based activated carbon. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 81, p. 1167-1171, 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.548>.

PALOMINO-ROMERO, J. A.; LEITE, O. M.; EGUILUZ, K. I. B.; SALAZAR-BANDA, G. R.; SILVA, D. P.; CAVALCANTI, E. B. Tratamentos dos efluentes gerados na produção de biodiesel. **Química Nova**, [S.l.], v. 35, n. 2, p. 367-378, Apr. 2012. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422012000200025>.

PASANGULAPATI, V.; RAMACHANDRIYA, K. D.; KUMAR, A.; WILKINS, M. R.; JONES, C. L.; HUHNKE, R. L. Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 114, p. 663-669, Jun. 2012. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.036>.

PASSOS, P. R. A. **Destinação sustentável de cascas de coco (*Cocos nucifera*) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. 2005. 166 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PERIYASAMY, S.; ADEGO, A. A.; KUMAR, P. S.; DESTA, G. G.; ZELALEM, T.; KARTHIK, V.; ISABEL, J. B.; JAYAKUMAR, M.; SUNDRAMURTHY, V. P.; RANGASAMY, G. Influencing factors and environmental feasibility analysis of agricultural waste preprocessing routes towards biofuel production – A review. **Biomass And Bioenergy**, [S.l.], v. 180, p. 1-18, Jan. 2024. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.107001>.

PIELICHOWSKI, K.; NJUGUNA, J.; MAJKA, T. M. Thermal degradation techniques. **Thermal Degradation Of Polymeric Materials**, [S.l.], p. 19-40, Nov. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-823023-7.00007-1>.

PITAKPOOLSIL, W.; HUNSOM, M. Treatment of biodiesel wastewater by adsorption with commercial chitosan flakes: parameter optimization and process kinetics. **Journal Of Environmental Management**, [S.l.], v. 133, p. 284-292, Jan. 2014. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.019>.

PONCE, J.; ANDRADE, J. G. S.; SANTOS, L. N.; BULLA, M. K.; BARROS, B. C. B.; FAVARO, S. L.; HIOKA, N.; CAETANO, W.; BATISTELA, V. R. Alkali pretreated sugarcane bagasse, rice husk and corn husk wastes as lignocellulosic biosorbents for dyes. **Carbohydrate Polymer Technologies And Applications**, [S.l.], v. 2, p. 1-8, Mar. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100061>.

PONGCHAIPHOL, Suchat; SURIYACHAI, Nopparat; HARARAK, Bongkot; RAITA, Marisa; LAOSIRIPOJANA, Navadol; CHAMPREDA, Verawat. Physicochemical characteristics of organosolv lignins from different lignocellulosic agricultural

wastes. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.l.], v. 216, p. 710-727, Sep. 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.007>.

POORNAPUSHPAKALA, S.; DAWN, S.s.; GOVIND, M. Arun; SANTHOSH, A.; NIRMALA, N.; BARANI, S.; NIRMALA, M. A novel image processing technique to evaluate biodiesel wastewater for recovery, recycle and reuse towards zero liquid discharge approach. **Biocatalysis And Agricultural Biotechnology**, [S.l.], v. 31, p. 1-10, Jan. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101874>.

QADEER, M. U.; AYOUB, M.; KOMIYAMA, M.; DAULATZAI, M. U. K.; MUKHTAR, A.; SAQIB, S.; ULLAH, S.; QYYUM, M. A.; ASIF, S.; BOKHARI, A. Review of biodiesel synthesis technologies, current trends, yield influencing factors and economical analysis of supercritical process. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 309, p. 1-14, Aug. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127388>.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus spp. **Cerne**, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 93-106, Apr. 2006. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/744/74412201.pdf>. Acesso em: 16. Jan. 2024.

RANADE, V. V.; BHANDARI, V. M. **Industrial Wastewater Treatment, Recycling, and Reuse**. 1st. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2014. p. 576. ISBN 978-0-08-099968-5.

REN21. **Renewables 2020 Global Status Report**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf. Acesso em: 5 maio 2021.

RIBEIRO, M. P.; BOTARI, A. Eficiência da remoção de DQO, surfactantes e de óleos e graxas totais na estação de tratamento de esgoto vila city na cidade de Paranavaí – Paraná / Efficiency of removal of DQO, surfactants and total oils and grease in the sewage treatment plant vila city in the city of Paranavaí - Paraná. **Brazilian Journal Of Health Review**, [S.l.], South Florida Publishing LLC, v. 5, n. 1, p. 3874-3884, 25 Feb. 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.34119/bjhrv5n1-331>.

RISEH, R. S.; VAZVANI, M. G.; HASSANISAADI, M.; THAKUR, V. K. Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries. **Industrial Crops And Products**, [S.l.], v. 208, p. 1-16, Feb. 2024. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117904>.

ROSA, M. F.; ABREU, F. A. P.; FURTADO, A. A. L.; BRÍGIDO, A. K. L.; NORÕES, E. R. V. Processo agroindustrial: obtenção de pó de casca de coco verde. Comunicado Técnico 61. **Embrapa Agroindústria Tropical**, Fortaleza, CE, 2001. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPAT/7874/1/ct_61.pdf. Acesso em: 26 fev. 2021.

RUDI, N. N.; MUHAMAD, M. S.; CHUAN, L. T.; ALIPAL, J.; OMAR, S.; HAMIDON, N.; HAMID, N. H. A.; SUNAR, N. M.; ALI, R.; HARUN, H. Evolution of adsorption process for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents. **Heliyon**, [S.l.], v. 6, n. 9, p. 1-13, Sep. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020>.

RUSSEL, J. B. **Química Geral**. Tradução e revisão técnica Márcia Guekezian *et al.* 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1994. v. 1. 621 p. ISBN 853460192-5.

RUTHVEN, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption Process. New York: John Wiley & Sons, 1984. p. 464. ISBN 0-471-86606-7.

SANDOUQA, A; AL-SHANNAG, M; AL-HAMAMRE, Z. Biodiesel purification using biomass-based adsorbent manufactured from delignified olive cake residues. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 151, p. 103-117, May 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.009>.

SANTAWEE, N.; TREESUBSUNTORN, C.; THIRAVETYAN, P. Lignin and holocellulose from coir pith involved in trimethylamine (fishy odor) adsorption. **Journal Of Environmental Sciences**, [S.l.], v. 79, p. 43-53, May 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.009>.

SANTOS, M. M. S.; LACERDA, C. F.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C.; RIBEIRO, A. A.; BEZERRA, M. A.; ARAÚJO, I. C. S.; GHEYI, H. R. Ecophysiology of the tall coconut growing under different coastal areas of northeastern Brazil. **Agricultural Water Management**, [S.l.], v. 232, p. 1-10, Apr. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106047>.

SAWADSITANG, S.; DUANGCHUEN, T.; KARAPHUN, A.; PUTJUSO, T.; KUMNORKAEW, P.; SWATSITANG, E. Synthesis, characterization and electrochemical properties of activated coconut fiber carbon (ACFC) and CuO/ACFC nanocomposites for applying as electrodes of supercapacitor devices. **Surfaces And Interfaces**, [S.l.], v. 25, p. 1-18, Aug. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101174>.

SCHACHEL, T. D.; STORK, A.; SCHULTE-LADBECK, R.; VIELHABER, T.; KARST, U. Identification and differentiation of commercial and military explosives via high performance liquid chromatography – high resolution mass spectrometry (HPLC-HRMS), X-ray diffractometry (XRD) and X-ray fluorescence spectroscopy (XRF): towards a forensic substance database on explosives. **Forensic Science International**, [S.l.], v. 308, p. 1-7, Mar. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110180>.

SEBRAE. O cultivo e o mercado do coco verde: A água de coco e suas propriedades isotônicas impulsionam a produção de coco verde no país, inclusive no interior de vários estados. In: SEBRAE. **Mercado e Vendas: Produto**. 1. ed. [S.l.], Jan 2016. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-do-coco-verde,3aba9e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD>. Acesso em: 30 nov. 2023.

SILVEIRA, M. S. **Aproveitamento das Cascas de Coco Verde para Produção de Briquete em Salvador – BA**. Orientador: Prof. Dr. Sandro Fábio César. 2008. 163 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo - Ênfase em Produção Limpa, Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J.; BRYCE, D.L. **Spectrometric Identification of Organic Compounds**. 8th. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2019. 455 p. ISBN 978-0-470-61637-6.

SIQUEIRA, L. A.; ARAGÃO, W. M.; TUPINAMBÁ, E. A. A introdução do coqueiro no Brasil. Importância histórica e econômica. Documentos 47. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Aracaju, SE, 2002. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/download/Documentos47.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2021.

SMARZEWSKA, S.; MORAWSKA, K. Wastewater treatment technologies. In: RAHMAN, R. O. A.; HUSSAIN, C. M. **Handbook of Advanced Approaches towards Pollution Prevention and Control: conventional and innovative technology, and assessment techniques for pollution prevention and control**. [S.l.]: Elsevier, 2021. v. 1. cap. 1. p. 3-32. ISBN 978-0-12-822121-1.

SOUZA, M. C. G.; OLIVEIRA, M. F.; VIEIRA, A. T.; FARIA, A. M.; BATISTA, A. C. F. Methylic and ethylic biodiesel production from crambe oil (*Crambe abyssinica*): new aspects for yield and oxidative stability. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 163, p. 368-374, Jan. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.073>.

STAROń, P.; CHWASTOWSKI, J.; BANACH, M. Sorption and desorption studies on silver ions from aqueous solution by coconut fiber. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 149, p. 290-301, Apr. 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.116>.

SULTANA, S.; ISLAM, K.; HASAN, M. A.; KHAN, H.M. J.; KHAN, M. A. R.; DEB, A.; RAIHAN, M. A.; RAHMAN, M. W. Adsorption of crystal violet dye by coconut husk powder: isotherm, kinetics and thermodynamics perspectives. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, [S.l.], v. 17, p. 1-10, May 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100651>.

SYAFIUDDIN, A.; CHONG, J. H.; YUNIARTO, A.; HADIBARATA, T. The current scenario and challenges of biodiesel production in Asian countries: a review. **Bioresource Technology Reports**, [S.l.], v. 12, p. 1-8, Dec. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100608>.

THOMAS, B. S.; YANG, J.; MO, K. H.; ABDALLA, J. A.; HAWILEH, R. A.; ARIYACHANDRA, E. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: a comprehensive review. **Journal Of Building Engineering**, [S.l.], v. 40, p. 1-12, Aug. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102332>.

TORRES, J. J.; CUELLO, M.; OCHOA, N. A.; PAGLIERO, C. Biodiesel wastewater treatment using nanofiltration membranes. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.l.], v. 148, p. 825-833, Apr. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.013>.

VIDIGAL, I. G. **Estudo da estabilidade oxidativa do biodiesel para a qualidade do biocombustível**. / Igor Gomes Vidigal, orientadora Ana Lúcia Gabas Ferreira. 2020. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química na Área de Desenvolvimento de Produtos e Processos) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. 2020.

VIDIGAL, I. G.; SIQUEIRA, A. F.; MELO, M. P.; GIORDANI, D. S.; SILVA, M. L. C. P.; CAVALCANTI, E. H. S.; FERREIRA, A. L. G. Applications of an electronic nose in the prediction of oxidative stability of stored biodiesel derived from soybean and waste cooking oil. **Fuel**, [S.l.], v. 284, p. 1-9, Jan. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119024>.

VIGIL, K. M. **Clean Water: An Introduction to Water Quality and Water Pollution Control**. 2nd. ed. Corvallis: Oregon State University Press, 2003. 176 p. ISBN 0-87071-498-8.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2nd. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. v.1. p. 243. 1996. ISBN 85-7041-114-6.

WANG, J.; LAUTZ, L. S.; NOLTE, T. M.; POSTHUMA, L.; KOOPMAN, K. R.; LEUVEN, R. S. E. W.; HENDRIKS, A. J. Towards a systematic method for assessing the impact of chemical pollution on ecosystem services of water systems. **Journal Of Environmental Management**, [S.l.], v. 281, p. 1-9, Mar. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111873>.

WU, J.; DU, X.; YIN, Z.; XU, S.; XU, S.; ZHANG, Y. Preparation and characterization of cellulose nanofibrils from coconut coir fibers and their reinforcements in biodegradable composite films. **Carbohydrate Polymers**, [S.l.], v. 211, p. 49-56, May 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.01.093>.

WU, L.; ZHANG, X.; SI, Y. Polydopamine functionalized superhydrophilic coconut shells biomass carbon for selective cationic dye methylene blue adsorption. **Materials Chemistry And Physics**, [S.l.], v. 279, p. 1-10, Mar. 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125767>.

YANG, Y.; LUO, X.; ZHANG, J.; MA, X.; SUN, P.; ZHAO, L. Sewage sludge–coconut fiber co-pyrolysis biochar: mechanisms underlying synergistic heavy metal stabilization and ciprofloxacin adsorption. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 375, p. 1-10, Nov. 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134149>.

YOUSEFIAN, F.; BABATABAR, M. A.; ESHAGHI, M.; POOR, S. M.; TAVASOLI, A. Pyrolysis of Rice husk, Coconut shell, and Cladophora glomerata algae and application of the produced biochars as support for cobalt catalyst in Fischer–Tropsch synthesis. **Fuel Processing Technology**, [S.l.], v. 247, p. 1-15, Aug. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107818>.

YUAN, J.; ZHU, Y.; WANG, J.; GAN, L.; HE, M.; ZHANG, T.; LI, P.; QIU, F. Preparation and application of Mg–Al composite oxide/coconut shell carbon fiber for effective removal of phosphorus from domestic sewage. **Food And Bioproducts Processing**, [S.l.], v. 126, p. 293-304, Mar. 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2021.01.004>.

ZHANG, Q.; ZHANG, D.; XU, H.; LU, W.; REN, X.; CAI, H.; LEI, H.; HUO, E.; ZHAO, Y.; QIAN, M. Biochar filled high-density polyethylene composites with excellent properties: towards maximizing the utilization of agricultural wastes. **Industrial Crops And**

Products, [S.I.], v. 146, p. 1-9, Apr. 2020. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112185>.

ZHENG, Y.; LI, F.; ZHANG, H.; WANG, S.; ZHAO, Z.; WANG, W.; CHEN, R. Fishhook characteristics of biodiesel lubricity during autoxidation. **Fuel**, [S.I.], v. 331, p. 1-10, Jan. 2023. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125897>.