

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS A. C. SIMÕES
INSTITUTO DE QUÍMICA E BIOTECNOLOGIA
QUÍMICA TECNOLÓGICA E INDUSTRIAL

EDUARDO EMANOEL BATISTA

**CARACTERIZAÇÃO E PURIFICAÇÃO DE BIOCARVÃO ADVINDO DA
INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA ALAGOANA**

Maceió AL
2024

EDUARDO EMANOEL BATISTA

**CARACTERIZAÇÃO E PURIFICAÇÃO DE BIOCARVÃO ADVINDO DA
INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA ALAGOANA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Química Tecnológica e Industrial da
Universidade Federal de Alagoas, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Química Tecnológica e Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Pablo Florez
Rodriguez.

Coorientador: Prof.^a. Dr.^a Aracelis J. Pamphile
Adrian.

Maceió AL
2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

B333c Batista, Eduardo Emanuel.

Caracterização e purificação de biocarvão advindo da indústria
sucroalcooleira alagoana / Eduardo Emanuel Batista. – Maceió, 2024.
52 f. : il.

Orientador: Pedro Pablo Florez Rodriguez.

Co-orientadora: Aracelis Jose Pamphile Adrian.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Química Tecnológica e
Industrial) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Química e
Biotecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 45-51.

Apêndices: f. 52.

1. Biocarvão - Caracterização. 2. Biocarvão - Purificação. 3. Biomassa. I.
Título.

CDU: 62-663-8

Folha de Aprovação

EDUARDO EMANOEL BATISTA

Caracterização e purificação de biocarvão advindo da indústria sucroalcooleira alagoana

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora do curso de Química Tecnológica e Industrial da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 04 de NOVEMBRO de 2024.



Documento assinado digitalmente
PEDRO PABLO FLOREZ RODRIGUEZ
Data: 28/04/2025 23:28:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Orientador - Prof. Dr. Pedro Pablo Florez Rodriguez, IQB - UFAL)

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
LUCAS NATA DE MELO
Data: 08/05/2025 02:49:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Examinador Interno – Prof. Dr. Lucas Natã de Melo, IQB - UFAL)



Documento assinado digitalmente
VANDERSON BARBOSA BERNARDO
Data: 30/04/2025 21:49:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Examinador Interno – Prof. Dr. Vanderson Barbosa Bernardo, IQB - UFAL)

Dedicado aos meus pais, Jô e Edson.

AGRADECIMENTOS

Antes de mais nada, gostaria de agradecer a todos que participaram desta minha trajetória de vida.

Agradeço aos meus pais, Josefa e Edson, pelo apoio e dedicação de toda a vida, em especial por sempre depositarem em mim suas expectativas, mas me permitirem trilhar meu próprio caminho, sempre ao meu lado.

Agradeço aos meus irmãos, Vitoria e João, por todos os momentos de conversas e troca de experiências, que me ensinaram e me ensinam a ver o mundo por tão diferentes perspectivas.

Agradeço a minha companheira, Kessy, por me incentivar e acreditar em mim todos os dias e me mostrar sempre como ser uma pessoa melhor.

Aos meus orientadores e amigos, Pedro e Aracelis, por todo o ensinamento acadêmico, por me mostrem caminhos onde ninguém mais enxergava, e trilharem juntos estes caminhos, por sempre acreditarem no meu potencial, e por todas as broncas e concelhos, que sei serem fruto de um amor verdadeiramente paterno e materno.

Aos meus amigos e companheiros de laboratório, Maria Juliana, Lís Andréia, Savio Figueiredo, Lais Balbino, Gabriela Monteiro, Nicholas, Jonas Andrade, Larissa, Pedro Malta, Arthur e toda família LC4, pela parceria e troca de conhecimentos.

Aos meus amigos, Victor Emanuel, Marcos Vinícios e Victoria Costa, que apesar de eu não estar presente em todos os momentos, foram fundamentais na minha trajetória e cultivo um carinho gigantesco por todos, ao Victor por seu companheirismo, ao Marcos por seu ímpeto acadêmico e a Victoria por seu espírito aventureiro.

A todos os professores do IQB, por se dedicarem tanto a nos ensinar uma das, se não a ciência mais bela de todas, a Química.

“O pensamento é a força criadora, O amanhã é ilusório, Porque ainda não existe, O hoje é real, é a realidade que você pode interferir; as oportunidades de mudança, tá no presente não espere o futuro mudar sua vida porque o futuro será a consequência do presente.”

(EDI ROCK, **A vida é um desafio**, 2002).

RESUMO

O presente trabalho promove a caracterização e purificação de dois biocarvões advindos de rejeitos da indústria sucroalcooleira Alagoana, das usinas Coruripe e Caeté, afim de conhecer suas propriedades para aproveitamento destas atividades futuras com maior valor agregado, tais como, adsorventes de contaminantes em efluentes, suportes catalíticos, entre outros. O processo de caracterização iniciou na separação dos rejeitos por granulometria com intuito de estudar as diferentes frações individualmente e de forma comparativa utilizando-se de peneiras com aberturas de malhas que vão de 28 à 200 Mesh. Foi realizada ainda uma purificação do biocarvão em um sistema desenvolvido também neste trabalho, que alcançou 92 % de eficiência na purificação. Características térmicas foram investigadas através de análises de termogravimetria e calorimetria exploratória diferencial, bem como análises espectrométricas permitiram identificação de compostos presentes nas amostras e direcionar o desenvolvimento do sistema de purificação.

Palavras-chave: biocarvão; biomassa; caracterização; purificação.

ABSTRACT

This work promotes the characterization and purification of two biochars derived from waste from the sugar and alcohol industry in Alagoas, from the Coruripe and Caeté plants, in order to understand their properties for future use in activities with greater added value, such as adsorbents of contaminants in effluents, catalytic supports, among others. The characterization process began with the separation of the waste by granulometry in order to study the different fractions individually and comparatively using sieves with mesh openings ranging from 28 to 200 Mesh. A purification of the biochar was also carried out in a system also developed in this work, which achieved 92% purification efficiency. Thermal characteristics were investigated through thermogravimetry and differential scanning calorimetry analyses, as well as spectrometric analyses that allowed the identification of compounds present in the samples and directed the development of the purification system.

Keywords: biochar; biomass; characterization; purification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rendimentos e características do biocarvão obtidos a partir de: pirolise rápida, lenta, torrefação, pirólise de carbonização hidrotérmica (HTC) e gaseificação.....	18
Figura 2 – Esquema da configuração da coluna de lixiviação projetada e usada por WANG et al., 2020.	19
Figura 3 – (a) Esquema de uso das peneiras na granulometria úmida, (b) Foto real do sistema	21
Figura 4 – Fluxograma de leitura de lâminas de teste	28
Figura 5 – Sequência de módulos de purificação	28
Figura 6 – Gráfico de barras de retenção de peneiras, (a) BCo23; (b) BCo16.	31
Figura 7 – Comparação visual do biocarvão C7, antes e depois da purificação.	33
Figura 8 – (a) Curva de TG comparativa C1-C7, (b) Curva TG-DSC C5.....	34
Figura 9 – Curva de TG-DSC da fração C1 em atmosfera de N ₂	35
Figura 10 – Comparação de concentração de elementos entre frações	37
Figura 11 – Difratoograma de PC7-PTG.....	39
Figura 12 – Gráfico de Adsorção/Dessorção C1 (a) e C7 (b).....	40
Figura 13 – Regressão linear vazão/tensão modulo 1	48
Figura 14 – Regressão linear Temperatura/Corrente Modulo 2	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sequência de peneiras, nomes de frações e abertura de malha.	23
Tabela 2 – Resultados da separação granulométrica e balanço de massa.	30
Tabela 3 – Resultados de purificação através da análise térmica	32
Tabela 4 – Resultados das curvas de TG-DSC para as frações C1 à C7 do BCo16.	34
Tabela 5 – Compilado de dados TG para BCo23, amb. ~ 120 °C e amb. ~ 800 °C.....	36
Tabela 6 – Resultado de EDX para todas as frações	36
Tabela 7 – Resultado de EDX considerando carbono TG	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMB	Temperatura Ambiente
B.E.T	Método Brunauer-Emmett-Teller
BC	Bagaço de cana-de-açúcar
BCA	Bagaço de Cana-de-açúcar
BJH	Método Barret, Joyner e Halenda
DSC	Calorimetria Diferencial exploratória
EDX	Espectrometria de raio-X por Energia Dispersiva
GCAR	Grupo de Catálise e Reatividade Química
HTC	Pirólise de carbonização hidrotérmica
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais do Centro de Tecnologia
MESH	Aberturas em uma polegada linear
NZE	Net Zero Emissions by 2050 Scenario
DRX	Difração de raio-X
TECNANO	Laboratório de Tecnologia de Nanosistemas Carreadores de Substâncias Ativas
TG	Análise termogravimétrica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS.....	14
2.1.	Objetivos geral.....	14
2.2.	Objetivos específicos.....	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1.	Biomassa.....	15
3.2.	Bagaço de Cana-de-açúcar.....	16
3.3.	Biocarvão.....	17
4.	METODOLOGIA.....	20
4.1.	Granulometria.....	20
4.1.1.	Método 1: Separação em duas etapas.....	20
4.1.2.	Método 2: Separação em uma etapa.....	22
4.1.3.	Sequência de peneiras.....	22
4.2.	Análises termogravimétricas.....	23
4.3.	Espectroscopia de fluorescência de raio-X por energia dispersiva (EDX).....	25
4.4.	Difração de raio-X (DRX).....	26
4.5.	Fisissorção de Nitrogênio.....	26
4.6.	Sistema de purificação por separação sólido-sólido.....	27
4.6.1.	Primeiro protótipo e teste da hipótese.....	27
4.6.2.	Segundo protótipo e adição de periféricos.....	28
4.6.3.	Calibração do módulo 1 e 2.....	29
4.6.4.	Utilização do sistema de purificação para obter biocarvão puro.....	29
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
5.1.	Análises granulométricas.....	30
5.2.	Sistema de purificação por separação Sólido-Sólido.....	31
5.2.1.	Resultados do primeiro protótipo.....	31
5.2.2.	Optimização do sistema.....	32
5.2.3.	Purificação do biocarvão BCa16.....	32
5.3.	Análises Térmicas.....	33
5.4.	Análises espectrométricas.....	36
5.5.	Análise de difração de raio-X.....	38
5.6.	Análise de fisissorção de nitrogênio.....	39
6.	CONCLUSÃO.....	41
	REFERENCIAS.....	42
	APÊNDICE A – regressões lineares de calibração de módulos auxiliares.....	48

1. INTRODUÇÃO

O biocarvão é descrito como um material sólido contendo em sua grande maioria carbono e partes de elementos naturais, e obtido por conversão termoquímica de biomassa, sendo esta conversão realizada por pirólise e combustão (ADENIYI et al., 2022; OGEMDI, 2019). Para que aconteça a conversão da biomassa em biocarvão deve-se ocorrer a carbonização, sendo uma condição para essa uma atmosfera com baixo ou nenhuma concentração de oxigênio (ADENIYI et al., 2022; OGEMDI, 2019).

Pode-se definir biomassa como um recurso obtido de organismos vivos (FRAGA et al., 2019), que é utilizado como uma fonte de carbono renovável e até mesmo como alternativa ao uso de combustíveis fósseis, como na produção de plásticos. (CHEN; YAN, 2019).

O biocarvão é um recurso amplamente explorado nas mais diversas áreas químicas, devido à fácil obtenção de suas matérias primas e versatilidade de rotas de síntese, além do seu apelo à química sustentável (ZHANG et al., 2019). Uma das principais aplicações do biocarvão é na área de produção de energia através de caldeiras (ZHANG et al., 2019; BHATIA et al., 2021), as caldeiras são a principal forma de explorar o bagaço de cana-de-açúcar dentro das usinas, para produção de energia térmica e/ou cogeração de energia elétrica, (HANSTED et al., 2023), é também largamente utilizada na absorção de contaminantes em efluentes (YU et al., 2018; BONI; COPELLI; RABONI, 2020; IWUOZOR et al., 2022), bem como na remoção de gases de efeito estufa (ZHANG et al., 2019), no setor agrícola a utilização de biocarvão já explorada de diversas formas, na melhoria das características do solo, regulação de pH e capacidade de retenção de água (LIAO; THOMAS, 2019; OBIA et al., 2018; RAZZAGHI; OBOUR; ARTHUR, 2020; WANG et al., 2019).

Aplicações para o biocarvão também incluem utilização em supercapacitores (ZHANG; GU; CHEN, 2023), (CHENG; ZENG; JIANG, 2017), catalisadores (CHAO et al., 2020), células de combustível (XIE et al., 2020) entre outras. O carvão como suporte catalítico já é bastante conhecido e explorado devido ao seu baixo custo, baixa interação com espécies catalíticas ativas, alta área específica, ajuste de porosidade, alta capacidade adsorptiva além de ser bastante resistente a ataques ácidos (MUNOZ et al., 2017).

O bagaço de cana-de-açúcar é o principal resíduo da produção de açúcar e álcool e é gerado após a moagem da cana-de-açúcar (ONN et al., 2023), sendo o bagaço de cana-de-açúcar um resíduo lignocelulósico fibroso, rico em carbono, barato e altamente abundante, se tornando por isso muito adequado para a produção de biocarvão (IWUOZOR et al., 2022).

Composto de aproximadamente 45% de celulose, 25% de hemiceluloses e 25% de lignina, além de uma pequena porcentagem de cinzas e proteínas, o bagaço de cana-de-açúcar é resistente à biodegradação e possui alto teor de carbono, o que aumenta suas capacidades de adsorção (WAZIRI; MUSTAPHA, 2024).

Estima-se que cerca de 1,6 bilhão de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar sejam produzidos anualmente em todo o mundo (KAMBOJ et al., 2024), sendo o Brasil, atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma produção anual de 7400 toneladas. (AJALA et al., 2021).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Geral

Caracterizar e estudar o biocarvão advindo do bagaço de cana-de-açúcar queimado, bem como desenvolver um sistema de separação sólido-sólido para purificação.

2.2. Objetivos específicos

- Fracionar por Granulometria para posterior caracterização;
- Caracterizar o biocarvão por Termogravimetria, Espectroscopia de fluorescência de raio-X, Difração de raio-X e Fisissorção de nitrogênio;
- Desenvolver um sistema de separação sólido-sólido para purificação;
- Utilizar o sistema desenvolvido para a purificação do biocarvão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Biomassa

MISHRA, et al., (2023), define biomassa como a substância biológica presente na biosfera, composta por diversos tipos de organismos vivos. As plantas verdes retêm o carbono do meio ambiente por meio da fotossíntese e o descarregam de volta na atmosfera. De acordo com os dados, a cada ano, as plantas transformam 4.500 EJ (exajoule) de energia solar e 120 Gigatoneladas (GT) de carbono do meio ambiente (WORLD BIOENERGY ASSOCIATION et al, 2016).

As indústrias de grande e médio porte do país baseiam sua produção principalmente em commodities agrícolas. Durante o processamento dessas matérias-primas, são geradas águas residuais e resíduos que podem, posteriormente, ser tratados para transformar-se em produtos valiosos. Contudo, o aproveitamento desses subprodutos, especialmente no que se refere à produção de ração animal e esterco, ainda é pouco frequente, resultando em uma acumulação de restos não aproveitados (KAMBOJ et al., 2024).

AJALA et al., (2021), classificam resíduos vegetais em duas principais categorias: os resíduos de campo e os resíduos de processo. Os primeiros são gerados durante a colheita e incluem folhas, caules, sementes e outros materiais que não são utilizados na produção final. Já os resíduos de processo surgem do processamento e refino das matérias-primas. Ambos os tipos de resíduos têm potencial significativo para serem reutilizados, mas frequentemente permanecem subaproveitados nas indústrias, desperdiçando a oportunidade de gerar valor adicional a partir desses materiais.

Os resíduos da agricultura consistem principalmente de celulose, lignina e hemicelulose. A celulose é o material orgânico mais comum no planeta, com as plantas produzindo centenas de toneladas métricas a cada ano (ROSALES-CALDERON E ARANTES, 2019). Ela possui uma alta resistência a tração e uma tolerância à degradação significativamente menor do que o amido e a glicose e o seu estado natural, a celulose parece ser um tipo de polímero composto por 1000 unidades de glicose conectadas através de uma ligação glicosídica β -1,4 (BETHKE et al., 2018).

A celulose tem uma elevada resistência química e bacteriana. A celulose forma ligações éter, bem como ligações de hidrogênio com a lignina e com as hemiceluloses, respectivamente. A hemicelulose parece ser um sistema polimérico que é intrincado, disperso, mas também heterogêneo, que está estruturalmente relacionado à celulose (WINTER et al., 2017). As unidades pirosil são conectadas por ligações glicosídicas (β -1,4). A hemicelulose é, de fato, um polímero de carboidrato, especificamente xilose. As combinações de hemicelulose de detritos de madeira macia e dura diferem (TARDY et al., 2021).

3.2. Bagaço de Cana-de-açúcar

A biomassa lignocelulósica pode ser gerada a partir da cana-de-açúcar, como o bagaço. O bagaço de cana-de-açúcar está amplamente disponível em todo o mundo em especial no Brasil e na Índia (KUSUMA et al., 2023). Para que o bagaço de cana-de-açúcar seja adequado como matéria-prima para suas inúmeras aplicações, são necessários o preparo e a purificação para modificar suas propriedades físicas e químicas. Por exemplo, antes de o bagaço de cana-de-açúcar ser usado para a produção de biocombustíveis e outros bioquímicos, a deslignificação é o passo inicial a ser dado, seguido pelo pré-tratamento e hidrólise (AJALA et al., 2021).

O Bagaço de Cana-de-açúcar (BCA) é uma biomassa fibrosa heterogênea com diversas aplicações. A composição química do bagaço pode variar em função de fatores como a variedade da cana-de-açúcar, as condições climáticas, a localização, as técnicas de cultivo, os fertilizantes utilizados e as características do solo. Em sua composição, são encontrados elementos típicos como celulose, hemicelulose, lignina, cinzas e proteína (ROBA et al., 2022; SADH et al., 2023).

A celulose ($C_6H_{10}O_5$)_m ($m = 300-1000$) e hemicelulose ($C_5H_8O_4$)_n ($n = 50-300$) são os compostos primários no BCA para a produção de biocombustíveis usando micróbios. A lignina, com sua estrutura irregular e a presença de grupos aromáticos, fenólicos e de hidrocarbonetos, é frequentemente vista como pouco produtiva e inibitória para os micróbios. Já a hemicelulose, que é um polissacarídeo com peso molecular menor que o da celulose, atua como um mediador na ligação entre lignina e celulose. Essa biomassa é heterogênea, altamente ramificada, amorfa, hidrofílica e compõe aproximadamente 25 % do peso total da biomassa (ROBA et al., 2022; PAN et al., 2022).

No entanto, a lignina, um polímero amorfo com uma estrutura de rede complexa, oferece rigidez e resistência ao estresse oxidativo e à degradação microbiana devido ao seu caráter aromático e interação covalente com resíduos de hemicelulose (CHEN et al., 2019).

As cinzas do BCA carbonizado, produzidas pela queima acima de 500 °C, podem ser utilizadas como cargas com reforço em diversos polímeros. Essas partículas possuem uma estrutura sólida, irregular e fina, o que as torna adequadas para a incorporação em matrizes poliméricas, uma vez que podem interagir de forma eficaz com a resina. Ao serem adicionadas aos polímeros, essas cinzas têm o potencial de melhorar as propriedades mecânicas, térmicas e eletromagnéticas dos materiais resultantes (KAMBOJ et al., 2024).

Essas cinzas são ricas em compostos como SiO_2 , Al_2O_3 , Mg e Fe_2O_3 , que são elementos fundamentais para a formação de estruturas altamente estáveis e resistentes. O SiO_2 é conhecido por suas propriedades de dureza e resistência ao desgaste, o que pode contribuir para aumentar a vida útil dos produtos finais. Já o Al_2O_3 , também é valorizado por sua resistência à corrosão e ao calor, e quando combinado com polímeros, pode oferecer uma proteção adicional contra condições adversas. Além da melhoria nas características mecânicas, as cinzas do BCA carbonizado podem também influenciar a resposta térmica dos polímeros, elevando o ponto de fusão e a resistência ao calor dos materiais compostos. (DEVADIGA; BHAT; MAHESHA, 2020).

A utilização das cinzas não se limita apenas à melhoria das propriedades físicas. Elas também podem contribuir para a sustentabilidade dos processos industriais, uma vez que permitem a valorização de resíduos gerados pela queima da biomassa (KAMBOJ et al., 2024).

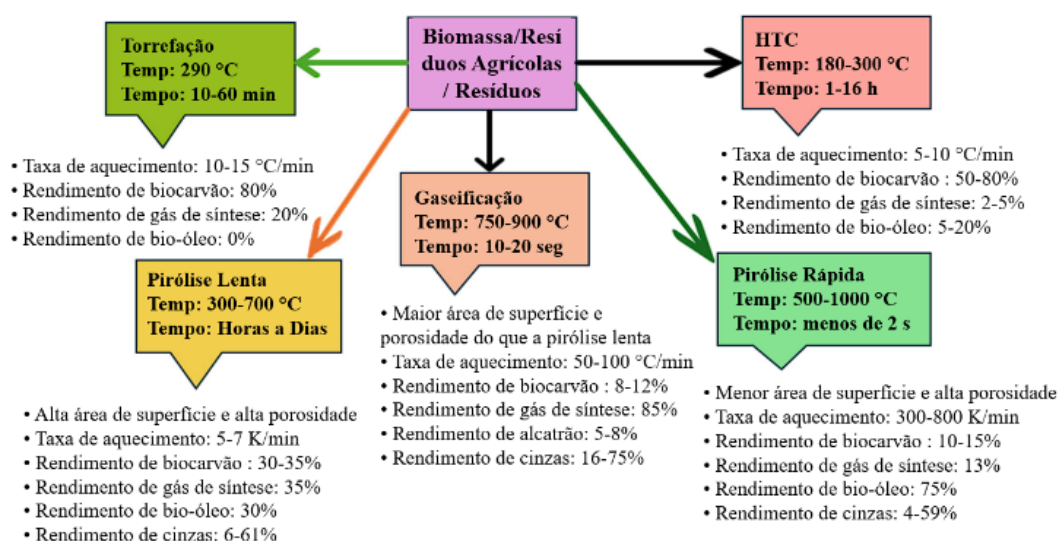
3.3. Biocarvão

No cenário internacional existe uma crescente e constata pressão para a redução da emissão de poluentes atmosféricos em especial o CO_2 , o “Net Zero Emissions 2050 Scenario” (NZE 2050) que é um roteiro normativo que mostra como o setor energético global pode atingir emissões líquidas de CO_2 iguais a zero até 2050 podendo então limitar o aquecimento global. O NZE 2050 prevê que até 2030, ocorrera um aumento relevante na utilização de bioenergia para substituir combustíveis fósseis. O uso de bioenergia moderna aumentou aproximadamente 7% ao ano entre 2010 e 2021 e atualmente está crescendo, IEA, (2024).

Existem diversas formas de produzir biocarvão a partir resíduos agrícolas, SARKAR et al., (2024) compilaram uma série de técnicas com seus respectivos rendimentos e condições, na figura 1, uma apresentação sistemática destas técnicas é apresentada.

O biocarvão tem sido empregado há milhares de anos para várias aplicações. A primeira indicação do uso do biocarvão na agricultura ocidental remonta a meados do século 19, embora sua história precisa possa ser ainda mais antiga. O uso do biocarvão no tratamento de água só recentemente atraiu o interesse de pesquisadores devido à poluição da água e à falta de água potável como resultado do desperdício da população em expansão. A escassez de água denota a falta de fornecimento de água doce em uma província para satisfazer os requisitos sociais e ambientais. Quatro bilhões de pessoas, ou cerca de dois terços da população mundial, sofrem extrema escassez de água por pelo menos um mês a cada ano SARKAR et al., (2024).

Figura 1 – Rendimentos e características do biocarvão obtidos a partir de: pirólise rápida, lenta, torrefação, pirólise de carbonização hidrotérmica (HTC) e gaseificação.



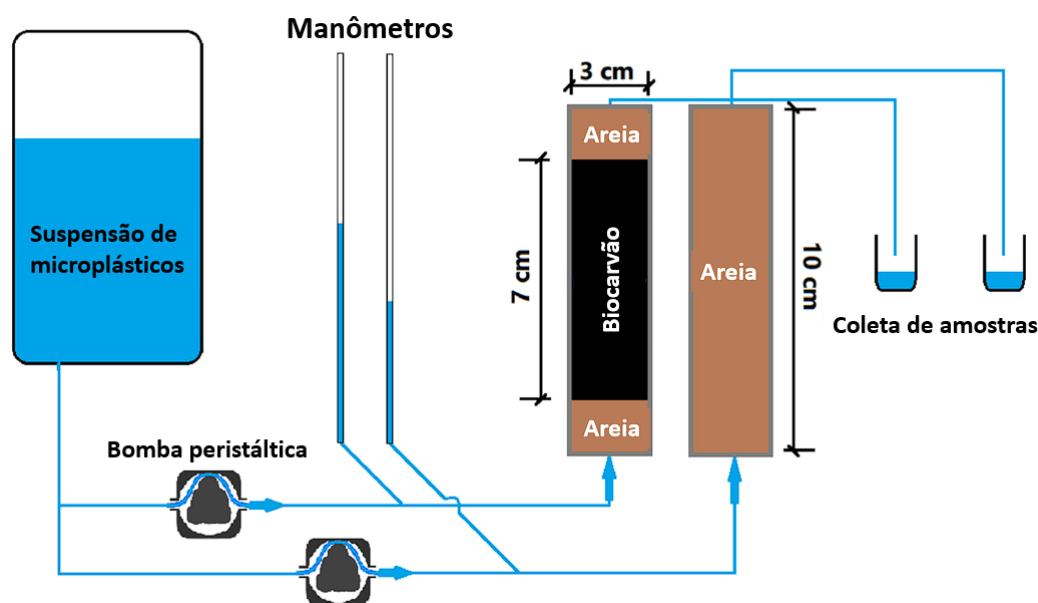
Fonte: Adaptado de SARKAR et al., 2024.

SARKAR et al., (2024) evidenciou que o biocarvão é um eficiente captador de diversos poluentes frequentes presentes em efluentes de origem animal, englobando substâncias orgânicas, metais, nitrogênio e fósforo. Em comparação com os produtos de carvão ativado disponíveis no mercado, um biocarvão magnético de boa qualidade que pode ser facilmente retirado do líquido após o processo de magnetização aparenta ser mais adequado para efluentes de animais.

Foi observado por WANG et al., (2020), que os filtros de areia mediados com biocarvão aumentaram a eficiência de remoção de microplásticos e resumiram o biocarvão como um investimento eficiente e de baixo custo para a remoção de microplásticos. O biocarvão, um material de carbono renovável, ganhou muita atenção como adsorvente devido às suas propriedades físico-químicas inerentes.

WANG et al., (2020), investigaram a eficiência de remoção de esferas microplásticas por diferentes filtros de biocarvão, uma série de experimentos de coluna de lixiviação foram realizados. As curvas de ruptura de cada filtro de biocarvão foram medidas primeiro. Os experimentos foram seguidos pela lavagem do sistema com água destilada para avaliar a estabilidade das partículas microplásticas presas ou adsorvidas no sistema. As amostras de biocarvão com 70 mm de comprimento foram acondicionadas em colunas cilíndricas de 100 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro. A amostra foi comprimida entre duas camadas de areia de sílica, cada uma com 15 mm de comprimento, conforme mostrado na Figura 2. O processo de preparação da coluna foi conduzido para garantir que a mistura mínima entre areia e biocarvão que pudesse vir a ocorrer durante o processo.

Figura 2 – Esquema da configuração da coluna de lixiviação projetada e usada por WANG.



Fonte: Adaptado de WANG et al., 2020.

4. METODOLOGIA

4.1. Granulometria

A granulometria consiste em uma sequência de peneiras com aberturas de malha distintas, que permite fracionar a amostra com base nos diâmetros dos grãos do material e quantificar a porcentagem de cada faixa de tamanho de grãos na amostra.

Dois métodos de separação por granulométrica foram adotados para o presente trabalho, a primeira metodologia é dividida em duas etapas, denominadas “úmida” e “seca”, sendo a úmida voltada para evitar a perda de material com alta dispersibilidade no ar utilizando água para arrastar as partículas e uma instrumentação de filtração a vácuo, já a seca utiliza-se também de uma sequência de peneiras, mas um agitador mecânico é o responsável pela separação do sólido.

Para a segunda metodologia o processo foi simplificado, sendo este apenas em uma etapa e denominada de granulometria seco/úmida, que utiliza a instrumentação da granulometria seca e uma quantidade menor de água do que a granulometria úmida para minimizar essas perdas, uma vez que a água não era responsável pelo arraste das partículas e apenas umedecia o biocarvão já separado para a transferência das peneiras para os frascos onde foram armazenadas. Essa técnica ajuda a reduzir a dispersibilidade das partículas mais finas, garantindo assim uma coleta mais eficaz da amostra.

4.1.1. Método 1: Separação em duas etapas

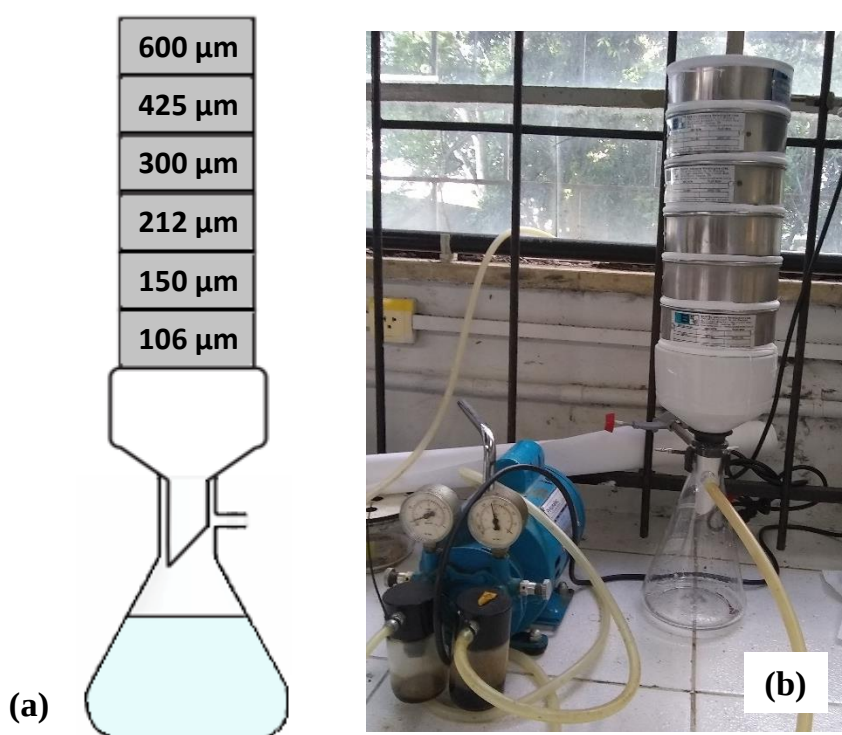
A primeira via deste método é a granulometria úmida, descrita anteriormente na sessão 4.1, inicialmente uma massa aproximada de 900 g de material foi separado em um béquer de vidro de mesmo volume, ainda dentro do béquer foi adicionado água destilada para limpar o material e retirar os solúveis presentes na amostra. Na Figura 3, a instrumentação é demonstrada e consiste na sequência de seis peneiras, demonstrada na Tabela 1, sendo a com maior abertura no topo e em ordem decrescente até a menor na parte inferior. Essa sequência de peneiras é posicionada sobre um funil de buchner com um filtro de papel para aparar partículas que eventualmente conseguissem passar pelo sistema granulométrico e ainda abaixo do funil um kitassato ligado a uma bomba de vácuo.

Foi iniciado o processo de granulometria úmida utilizando a amostra ainda com

a água, acionando a bomba de vácuo e adicionando novas porções de água no topo da coluna ao desligar o sistema as peneiras e o filtro de papel eram verificados, se os mesmos estivessem saturados de material retido, esse material era retirado para outros recipientes devidamente identificados. Já os filtros quando saturados eram postos juntos em uma placa de petri.

Os materiais que foram retirados das peneiras foram postos na estufa com temperatura aproximada de 90 °C para favorecer a evaporação da água e resgate das frações separadas.

Figura 3 – (a) Esquema de uso das peneiras na granulometria úmida, (b) Foto do sistema



Fonte: Autor, 2024

Após a realização da granulometria úmida, foi iniciada a granulometria seca, utilizando um agitador mecânico para análise granulométrica, equipamento cedido para uso pelo LEMA.

O procedimento da granulometria seca difere da úmida principalmente pela necessidade que o material esteja completamente seco, por isso o material que ainda não havia passado pelo primeiro procedimento foi levado a estufa nas mesmas condições dos materiais que foram retirados das peneiras.

Com o material seco o seguinte procedimento foi realizado:

- Depositou-se o material no topo da sequência de peneiras;
- As peneiras com o material foram posicionadas no centro do agitador, e fixadas a base;
- Iniciada a agitação, com duração de 5 minutos, em potência média;
- Após a agitação, permaneceu em repouso por 1 minuto para evitar dispersão no ar;
- Abriu-se então o sistema de cima para baixo retirando todo material contido em diferentes frascos.

O processo foi repetido 5 vezes até que todo material restante do primeiro procedimento tivesse sido processado.

4.1.2. Método 2: Separação em uma etapa

Como alternativa para o primeiro método, o método 2 foi idealizado para simplificar o método mantendo a eficiência. Para isto, um volume aproximado de 2 Kg de material foi separado, dividido em 4 partes e depositado sobre uma sequência de peneiras, demonstrada na Tabela 1, posicionando sobre o agitador mecânico e fixadas no mesmo, ligando-o em seguida o sistema e permanecendo sob agitação por 10 minutos em potência máxima, após a agitação foi estabelecido um tempo de repouso de 5 minutos, só então as peneiras foram abertas e na transferência as frações eram umedecidas com água destilada e transferidas para frascos devidamente identificados e pesados anteriormente afim de quantificar as porcentagens de retenção de cada intervalo de peneira.

Os cálculos das concentrações foram feitos através da equação seguinte.

$$\frac{\text{massa da amostra retida na peneira } x}{\text{massa total da amostra}} * 100\% = \% \text{ retida } x \quad \text{Equação 1}$$

4.1.3. Sequência de peneiras

Uma sequência de seis peneiras foi adotada para ambos os métodos, com aberturas de malhas diferentes, seis peneiras originam assim sete diferentes frações, sendo a 7ª o fundo das peneiras, o que fica retido após a última peneira da sequência.

Tabela 1 – Sequência de peneiras, nomes de frações e abertura de malha.

Peneira	Biocarvão Caeté, 2016 (BCa16)			Biocarvão Coruripe, 2023 (BCo23)		
	Fração	Mesh	Diâmetro (μm)	Fração	Mesh	Diâmetro (μm)
1°	C1	28	$d > 600$	PC1	30	$d > 595$
2°	C2	35	$600 > d > 425$	PC2	40	$595 > d > 400$
3°	C3	48	$425 > d > 300$	PC3	60	$400 > d > 250$
4°	C4	65	$300 > d > 212$	PC4	80	$250 > d > 177$
5°	C5	100	$212 > d > 150$	PC5	100	$177 > d > 149$
6°	C6	150	$150 > d > 106$	PC6	200	$149 > d > 74$
FUNDO	C7	~	$d < 106$	PC7	~	$d < 74$

Fonte: Autor, 2024

4.2. Análises termogravimétricas

Foram realizadas análises termogravimétricas em atmosfera de ar sintética para o biocarvão BCa16 em todas as frações separadas por granulometria a fim de determinar as concentrações de carbono, estabilidade térmica e temperaturas de decomposição. Análises termodiferencial também foram realizadas juntamente com o TG, essas tiveram um intuito de determinar a natureza das reações envolvidas nas perdas de massa da amostra.

Para estas análises, utilizou-se do equipamento de análises térmicas Discovery SDT 650, cedido para uso pelo GCar, os gases utilizados nas análises tiveram uma vazão de 50 mL / min, com rampa de aquecimento de 10 °C / min, uma temperatura máxima de 850 °C e utilizando um cadinho de alumina de 90 μL .

As análises termogravimétricas são amplamente utilizadas para caracterizar material quanto a sua estabilidade térmica, componentes voláteis, temperaturas de transição de fase, temperaturas de decomposição térmica e sendo possível até analisar a composição química das amostras, muita utilizada na caracterização de sólidos, mas também sendo possível a utilização de amostras líquidas.

Esta análise consiste em um conjunto de balança de precisão e um forno de temperatura controlada, através da comparação com uma referência e à medida que o forno aquece a uma determinada rampa de aquecimento mede-se a perda ou eventual ganho de massa em decorrência desse aumento de temperatura, com isso é possível graficar e analisar o comportamento desta curva.

Existe ainda uma técnica chamada de análise termodiferencial, que utilizasse do mesmo experimento e compara a diferença de temperatura entre a amostra e um cadinho “branco” a fim de identificar sutis diferenças nessa temperatura e identificar a natureza das reações, que ocorrem nos eventos de perda de massa, sabendo se essas reações são exotérmicas ou endotérmicas por exemplo.

Também foram feitas análises em atmosfera de N_2 , entretanto, foi realizada apenas para as amostras C1, e com temperatura máxima de $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, já que a intenção dessas análises foram observar apenas as perdas de massa e reações relacionadas apenas a mudança de temperatura e não a interação com atmosfera oxidante.

Para o biocarvão BCo23 devido uma limitação de instrumentação, a termogravimetria realizada foi desenvolvida em mufla em atmosfera oxidante, e consiste em realizar uma pesagem sistemática dos cadinhos utilizados e da massa de amostra a ser analisada, antes e depois do aquecimento, obtendo então a perda de massa.

Os seguintes passos foram adotados para todas as análises deste tópico:

- Pesagem em balança analítica e em triplicata do cadinho com tampa em rodizio com os demais cadinhos;
- Tara da balança, adição da amostra até um volume determinado aproximado para todas as frações;
- Pesagem direta em triplicata da amostra;
- Pesagem direta em triplicata do conjunto Cadinho/Tampa/Amostra;
- Posicionamento do cadinho no interior da mufla;
- Medição da temperatura interna da mufla e início do aquecimento até a temperatura programada;
- Ao alcançar a temperatura programada, início do resfriamento do sistema;
- Após o resfriamento total até a temperatura ambiente a mufla é aberta e o conjunto é retirado;
- Pesagem do conjunto diretamente em triplicata
- Coleta de dados e cálculos de porcentagem de perda de massa.

Foram realizados dois pontos em todas as frações após a gravimetria, o primeiro deles foi de temperatura ambiente até $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ para determinar a quantidade de água presente, e outro a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ para determinar a massa de biocarvão presente naquela fração, com o intuito de estimar qual destas frações tinha maior concentração de carvão, e por consequência menor concentração

de matéria inorgânica. Estes pontos máximos de temperatura foram definidos através de análises termogravimétricas anteriores, realizadas no biocarvão BCa16.

4.3. Espectroscopia de fluorescência de raio-X por energia dispersiva (EDX)

Todas as frações foram submetidas a uma análise de espectroscopia de raio-X de energia dispersiva no equipamento EDX-7000, SHIMADZU, cedido para uso pelo TECNANO, para todas análises foram utilizadas células de extremidade aberta Geral X-Cell (sem tampa), de diâmetro externo: 31,6 mm e volume 10 mL fabricado em polietileno, e vedada com filme de polipropileno, como indicado pelo fabricante, que permite a irradiação da amostra em seu feixe inferior.

A espectroscopia de raio-X é uma das muitas técnicas que utilizam-se de raio-X de diversas formas baseadas nas medidas de emissão, absorção, espalhamento, fluorescência e difração desta radiação eletromagnética para fins qualitativos e quantitativos, a emissão de raio-X para boa parte destas técnicas é proveniente de um tubo de raio-X, conhecido também como lâmpada de raio-X, este possui um ânodo metálico bombardeado por elétrons altamente acelerados a partir do cátodo, que após se chocarem com esse ânodo desaceleram e parte desses elétrons convertem-se em raio-X, sendo esse o método mais comum para geração de raio-X nesses tipos de análise, mas existem também outras formas de emissão. (Skoog et al., 2002)

A técnica consiste em irradiar a amostra com um feixe de raio-X, que faz com que seus elementos absorvam o feixe primário e emitam linhas características de fluorescência de raio-X para cada elemento presente, para o método de energia dispersiva um feixe policromático é utilizado e sua fonte de emissão fica próximo a amostra, o que permite que utilize-se uma fonte com intensidade menor em comparação que aparelhos de dispersivo de comprimento de onda, que utilizam-se cristal difrator e colimador, a principal diferença então fica por parte da detecção, sendo na técnica de energia dispersiva através da energia emitida simultaneamente em seu feixe policromático e na técnica de dispersivo de comprimento de onda em um único canal devido seu monocromador. (Skoog et al., 2002)

A análise identifica e quantifica os elementos presentes na amostra permitindo assim caracterizar cada fração. O intervalo de resolução do equipamento vai do ^{11}Na ao ^{92}U , por conta disso não é possível através desse método quantificar o ^{12}C , entretanto o mesmo pode ser quantificado em conjunto da técnica de TG.

Foram calculadas as porcentagens para cada amostra considerando a porcentagem de carbono estabelecida na análise de TG em ar sintético. Esses cálculos foram realizados através da equação abaixo:

$$(100\% - \% C \text{ da fração}) * (\% \text{ do elemento pelo EDX}) = \% \text{ real do elemento} \quad \text{Equação 2}$$

4.4. Difração de raio-X (DRX)

As análises foram realizadas em um equipamento XRD-7000 X-ray diffractometer, SHIMADZU, cedido para uso pelo TECNANO, com os seguintes parâmetros: radiação $\text{CuK}\alpha$, variação angular $2\theta = 10^\circ$ à 90° com passo de $1,0^\circ$, 1s/ passo e rotação de 15 RPM.

A difração de raio-X utiliza radiação eletromagnética na região de raio-X, gerados a partir de um tubo de raio-X, assim como descrito na seção 4.3, nesse caso tem o intuito de identificação de estruturas cristalinas presentes em sólidos, a análise consiste em distribuir a amostra em um fino pó sobre um porta amostras plano com uma cavidade redonda em ~ 1 mm de rebaixo, e nivelar a amostra com o auxílio de uma lamina de vidro de modo a não formar marcas ordenadas na superfície do sólido uma vez que o raio X interage com a superfície da amostra para identificar os padrões de difração, e estas marcas poderiam gerar uma falsa orientação das partículas ocasionando em resultados não confiáveis. A fim de conhecer a natureza da parte inorgânica presente no biocarvão, uma análise de DRX foi realizada nas cinzas, uma vez que estas continham todo material inorgânico presente.

As análises foram realizadas em um equipamento XRD-7000 X-ray diffractometer, SHIMADZU, cedido para uso pelo TECNANO, com os seguintes parâmetros: radiação $\text{CuK}\alpha$, variação angular $2\theta = 10^\circ$ à 90° com passo de $1,0^\circ$, 1s/ passo e rotação de 15 RPM.

4.5. Fisissorção de Nitrogênio

As análises de fisissorção foram realizadas num equipamento Accelerated Surface Area and Porosimetry ASAP 2020, Micrometrics, cedido para uso pelo LSCat, à temperatura de N_2 líquido, $\sim -196^\circ\text{C}$. A amostra C1 e C7 foi acondicionada sob vácuo ($\sim 4 \mu\text{Hg}$) a 250°C até atingir novamente a pressão de aproximadamente $4 \mu\text{Hg}$, este processo levou aproximadamente 4 h. A análise consistiu na determinação da área específica pelo método multiponto Brunauer-Emmett-Teller (B.E.T.) e as isotermas foram geradas a partir de 20 pontos de adsorção e 20 pontos de dessorção e teve uma duração de 3 h. O volume de poros foi determinado pelo método

BJH.

A fisissorção de nitrogênio é uma técnica que permite avaliar as características estruturais da superfície de materiais sólidos, como a área específica do sólido, tamanho de poros e até mesmo estimar a geometria destes poros, estas informações são calculadas através das isortermas, gráficos com temperatura constante, normalmente a temperatura de N₂ líquido, com variação de pressão que vai de vácuo até 1 atm.

4.6. Sistema de purificação por separação sólido-sólido

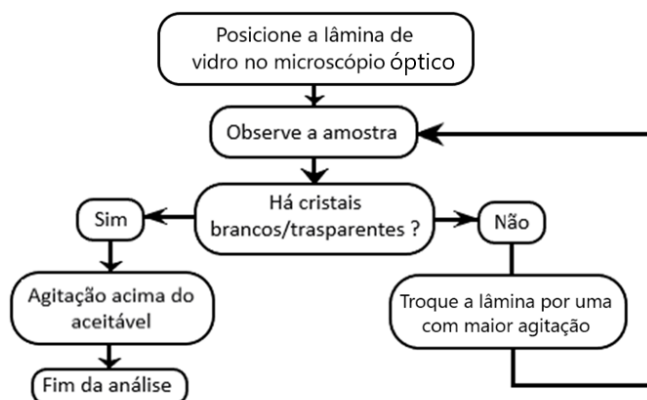
Mesmo após o fracionamento do biocarvão sintetizado por granulometria se fez necessário um modo de separar a parte inorgânica do biocarvão, uma vez que a separação por tamanho de grão não é suficiente já que para todas frações as duas partes estavam presentes, e com o intuito de utilizar ambas em diferentes aplicações, meu grupo de pesquisa começou a desenvolver um sistema de separação sólido – sólido para purificação que explora a diferença de densidade dos sólidos para promover a separação.

4.6.1. Primeiro protótipo e teste da hipótese

Os primeiros protótipos foram feitos em polietileno e instrumentação simplificada, O primeiro teste, consistiu em coleta de alíquotas após períodos de separação com o intuito de determinar alguns parâmetros simples e comprovar a purificação do biocarvão.

Um método foi então estabelecido, seguindo os passos:

- Carregar o sistema com o sólido a ser purificado;
- Fixar os parâmetros do ensaio;
- Iniciar o processo de purificação;
- Aguardar estabilizar o sistema;
- Coletar uma alíquota;
- Transferir essa para uma lâmina de vidro;
- Alterar o parâmetro para o próximo ponto;
- Observar as lâminas no microscópio ótico para análise de efetividade da separação seguindo um fluxograma exposto na figura 4.

Figura 4 – Fluxograma de leitura de lâminas de teste

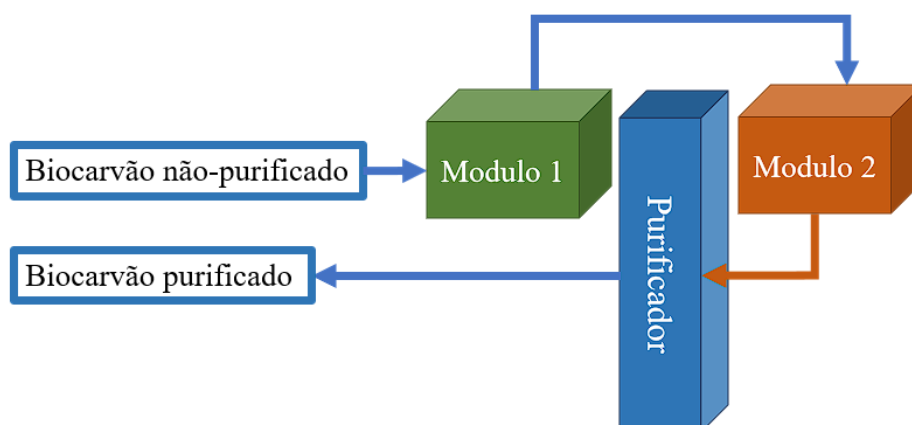
Fonte: Autor, 2024

Um total de 5 pontos por ensaio foram feitos, e o período de estabilização foi de ~3min, e a cada nova alíquota as lâminas de vidro, eram levadas a um microscópio ótico (ZEISS, Stemi 2000-C) para visualizar se o sólido estava purificado.

4.6.2. Segundo protótipo e adição de periféricos

Após a comprovação de viabilidade da purificação alterações foram feitas no sistema a fim de melhorar a eficiência da separação e um outro sistema foi desenvolvido, com a adição de dois módulos periféricos extras, modulo 1 controlando a vazão e modulo 2 a temperatura e uma aparelhagem de vidro para o purificador.

Na figura 5 pode-se observar os módulos periféricos e o purificador que compuseram o sistema, em uma sequência que promovesse o fluxo continuo do processo.

Figura 5 – Sequência de módulos de purificação

Fonte: Autor, 2024

4.6.3. Calibração do módulo 1 e 2

Devido a fabricação em laboratório dos módulos, foi feito a calibração utilizando um tubo graduado, previamente aferido, e cronometrando o tempo para cada tensão até alcançarem um determinado volume, em intervalos de 1 volts, o teste foi feito em triplicata.

Esses dados foram tabelados e calculados os valores de vazão para cada tensão através equação 3.

$$\frac{\text{Volume medido (mL)} * 60 (\text{segundos})}{\text{Tempo cronometrado (segundos)}} = \text{Vazão (mL/min)} \quad \text{Equação 3}$$

Os valores vazão/tensão foram então graficados e uma análise de regressão linear foi feita possibilitando a linearização dos pontos estabelecidos e obtendo assim a equação da reta a qual será utilizada para o ajuste de tensão para cada determinada vazão.

Já para o modulo 2 de temperatura por convecção térmica, a precisão da temperatura da fase líquida tem influência direta da vazão. Para a realização da calibração adotou-se uma vazão de ~ 300 mL / min. O modulo tem um sistema de controle de corrente elétrica, sendo esse responsável pelo aumento e diminuição da temperatura.

A calibração teve intervalos de 10 min de estabilização, conforme a corrente elétrica era selecionada, indo de 0,01 Å até 1,05 Å com intervalos de 0,15 Å.

4.6.4. Utilização do sistema de purificação para obter biocarvão puro

Após os testes o sistema foi utilizado para seu proposito inicial de purificar o biocarvão, isolando o material inorgânico, utilizou-se um procedimento de batelada, com sucessivas adições de uma determinada massa de biocarvão BCa16 ao sistema, esta massa foi determinada com base na concentração de carbono presente para cada amostra, após iniciar o procedimento, este ficava em funcionamento até a saturação do sistema.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análises granulométricas

Os dois biocarvões, BCo23 e BCa16, passaram pelo processo granulométrico, e tiveram massa iniciais diferentes, sendo para o BCo23, uma massa de 1929,39 g, que estava disposta em quatro frascos distintos, já para o BCa16 foram apenas 935,24 g e ficou contida em apenas um frasco. Um balanço de massa foi realizado para ambos a fim de identificar perdas de massa no processo de separação, os dados coletados para as duas análises granulométricas foram compilados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados da separação granulométrica e balanço de massa.

Fração BCo23	Massa (g)	% Massa	Fração BCa16	Massa (g)	% Massa
C1	65,8	7,20	PC 1	91,69	4,78
C2	9,9	1,08	PC 2	229,06	11,95
C3	180,9	19,78	PC 3	347,53	18,13
C4	213,3	23,32	PC 4	297,29	15,51
C5	298,2	32,60	PC 5	287,65	15,01
C6	101,5	11,09	PC 6	304,76	15,90
C7	45,1	4,92	PC 7	359,01	18,73
Total	914,52	100	Total	1916,98	100
Balanço de massa			Balanço de massa		
Perda de massa (g)	% de perda		Perda de massa (g)	% de perda	
20,72	2,22		12,41	0,65	

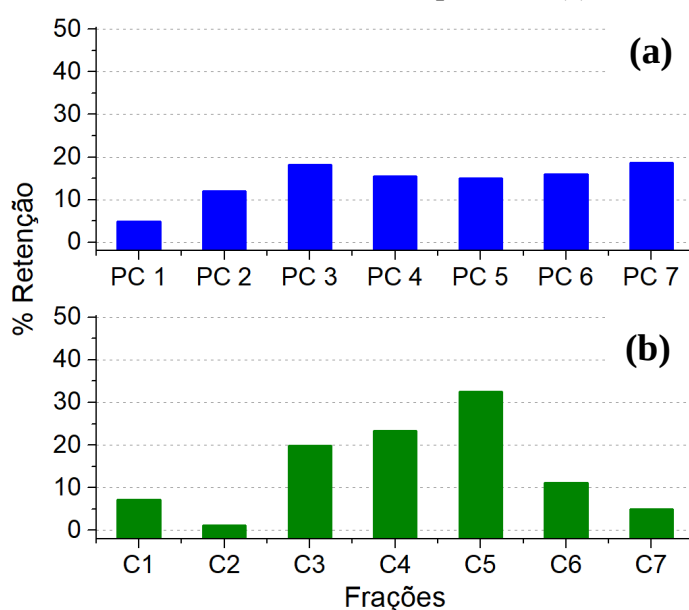
Fonte: Autor, 2024

Através do balanço de massa, foi identificada uma perda de massa não expressiva de 0,65% para o BCo23, já para o BCa16, uma perda de massa de 2,22% significativamente maior que o anterior, estas perdas são atribuídas à suspensão de partículas no ar durante o processo, se provando assim que a utilização da metodologia aplicada no biocarvão com menor perda, é mais eficiente.

As frações C5 e PC7 foram as que apresentaram as maiores porcentagem de retenção nas peneiras. Na figura 6 pode-se observar que para o BCo23, a distribuição de massa foi mais uniforme, com pouca diferença entre as frações, já para o BCa16, uma distribuição mais centralizada no intervalo de peneiras. A fração PC7 e C7, tem menor diâmetro de partícula, e

esperasse que estas frações possuam uma área específica maior, uma alta área específica é crucial em processos de adsorção entre outras aplicações, pois melhora a cinética das reações devido ao aumento da superfície de contato. Em contra partida, o alto valor da massa retida nesta fração indica uma quantidade maior de matéria inorgânica, uma vez que está possui uma densidade maior.

Figura 6 – Gráfico de barras de retenção de peneiras, (a) BCo23; (b) BCa16.



Fonte: Autor, 2024

Todas as frações analisadas apresentaram uma coloração acinzentada, resultado da presença de matéria inorgânica em sua composição. Essa coloração é um indicativo dos minerais presentes nas amostras.

5.2. Sistema de purificação por separação Sólido-Sólido

Este sistema de purificação está sendo desenvolvido e encontrasse em processo de patenteamento, devido a isto, algumas informações contidas nesses resultados foram propositalmente vagas.

5.2.1. Resultados do primeiro protótipo

Foi possível comprovar a purificação através da visualização das partículas de biocarvão isoladas nas lâminas de vidro, notou-se ainda que para condições mais brandas do sistema, a

purificação foi mais eficiente, isso ocorre devido ao movimento menos turbulento do sistema que favorece a purificação.

5.2.2. Otimização do sistema

A adição dos módulos se mostrou promissoras, uma vez que estes permitem o maior controle sobre o sistema, tornando possível o emprego do sistema para os mais variados sólidos. O vidro foi escolhido para o purificador devido a sua resistência a variação de temperatura, transparência e resistência física considerável. O principal resultado das calibrações foram os gráficos contendo os pontos de calibração e suas respectivas regressões lineares, essas regressões lineares foram expostas nos apêndices.

5.2.3. Purificação do biocarvão BCa16

Por se tratar do biocarvão com maior concentração de carbono, e por consequência de mais fácil purificação, optou-se por trabalhar com as frações C1 e C7 do BCa16, e foram nomeadas de CS1 e CS7, respectivamente após a purificação, análises de TG e EDX foram feitas após a purificação a fim de quantificar a eficiência.

Na tabela 3 os dados foram contidos a título comparativo e utilizou-se como base na quantidade de material inorgânico ainda restante na amostra, considerando uma remoção total como eficiência máxima. Notasse então uma eficiência expressiva para a fração C7, alcançando uma eficiência de $\sim 92\%$, entretanto apesar de menos eficiente para C1 é possível notar que ambas alçaram $\sim 90\%$ de pureza, resultado bastante promissor.

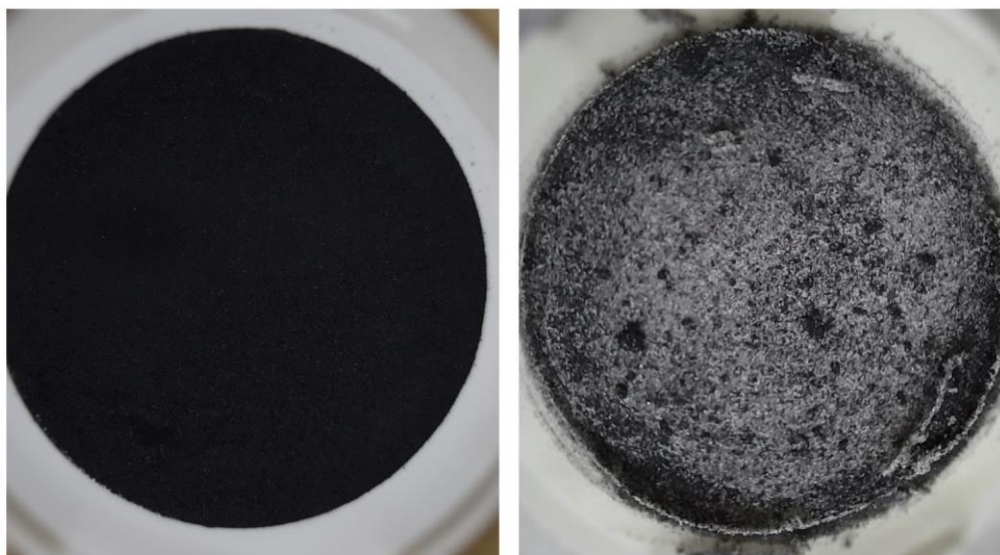
Tabela 3 – Resultados de purificação através da análise térmica

Dados	C1	CS1	C7	CS7
% de H ₂ O	14,54	6,42	9,71	8,28
% Carvão	80,74	90,23	66,32	89,79
% Inorgânico	4,72	3,35	23,97	1,93
% Eficiência	29,0		91,9	

Fonte: Autor, 2024

Na figura 7 estão registradas fotos dos biocarvões C7 antes e depois da purificação para comparação visual, e é evidente a remoção das partículas inorgânicas.

Figura 7 – Comparação visual do biocarvão C7, antes e depois da purificação.



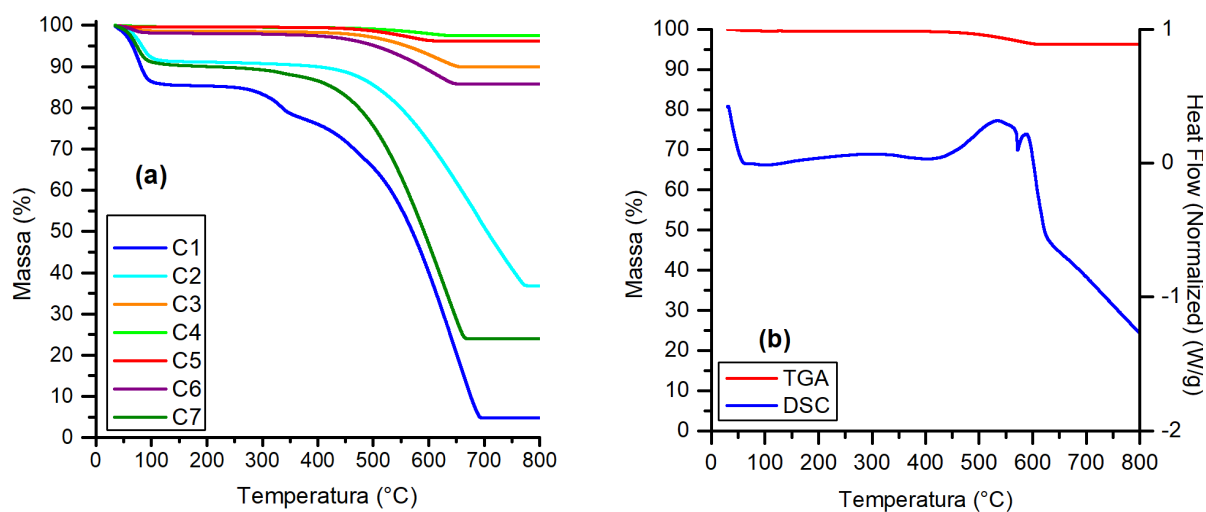
Fonte: Autor, 2024

5.3. Análises Térmicas

Na figura 8 estão dispostos os gráficos de TG para o biocarvão BCal6, bem como uma curva de TG-DSC para a fração C5, as análises apresentaram comportamento similares, os quais tiveram duas perdas de massa características, descritas na tabela 4 para frações C1, C2 e C7 uma porcentagem de água maior que as demais frações foi observada, para essas a perda de água foi quase que imperceptível apenas pelo gráfico de TGA, essa perda pode ser constatada pela análises DSC da fração C5, na qual é notável a presença da reação endotérmica que está relacionada com a perda de água do material.

Todas as frações voltam a perder massa com pico próximo aos $\sim 420^{\circ}\text{C}$, perda essa que foi atribuída a incineração do carbono presente nas frações, podendo assim mensurar a quantidade de carbono presente em cada fração, essa perda se mantém até a uma determinada temperatura final a qual varia conforme a fração essa variação está relacionada com a quantidade de massa variável para cada análise.

Figura 8 – (a) Curva de TG comparativa C1-C7, (b) Curva TG-DSC C5.



Fonte: Autor, 2024

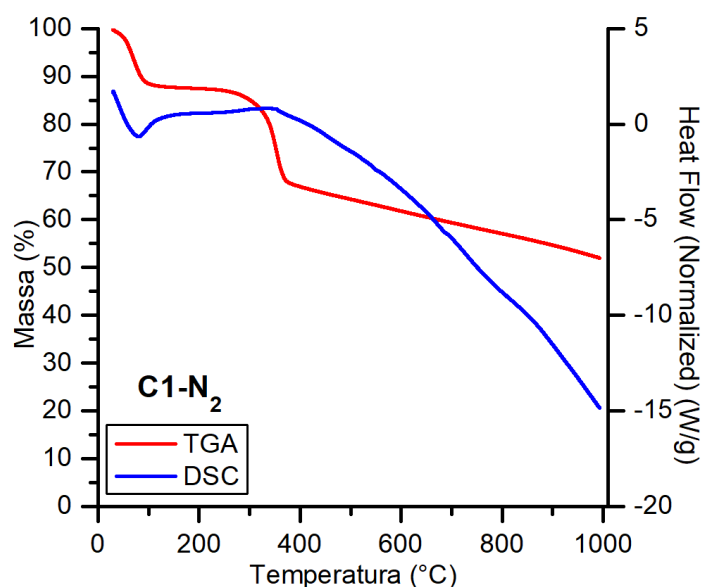
Tabela 4 – Resultados das curvas de TG-DSC para as frações C1 à C7 do BCa16.

Dados	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
% de H ₂ O (150°C)	9,71	1,91	0,42	0,33	1,43	8,78	14,54
% Carvão	66,32	12,27	3,35	2,05	8,64	54,39	80,73
% Inorgânico	23,97	85,81	96,22	97,60	89,92	36,82	4,72
Perda Primária (°C)	295-355	317-352	-	-	-	-	227-368
Perda Secundária (°C)	-	-	-	-	-	-	399-484
Temp. Final (°C)	686	680	650	670	682	795	715
% Perda total	76,03	14,19	3,78	2,40	10,08	63,18	95,28

Fonte: Autor, 2024

Foi observado ainda que para a fração C1 uma perda de massa intermediária entre a perda de água e a incineração do carbono, no intervalo de temperatura de 335°C e 465°C ocorreu. A Figura 9 trata-se do resultado de uma análise de TG-DSC em atmosfera inerte de N₂ foi realizada com o intuito de compreender a natureza deste evento de perda de massa, e pode-se então observar que a mesma perda de massa ocorria mesmo em atmosfera inerte, o que devido a faixa de temperatura foi atribuído então a decomposição térmica de celulose e lignina.

Figura 9 – Curva de TG-DSC da fração C1 em atmosfera de N₂



Fonte: Autor, 2024

Na tabela 5 encontrasse os dados das análises de TG do biocarvão BCo23, os resultados de todas as 7 frações foram compilados para fins comparativos. Analisando os resultados podemos observar as duas perdas de massa realizadas e com base nas análises instrumentais realizadas anteriormente, é atribuída a primeira perda de massa a desidratação da amostra, e a outra a decomposição do carbono presente, nos dando assim como descrito, a % de carvão presente, para a fração PC7 uma maior perda de massa total é notada em comparativo com as demais frações desta fonte, e por consequência maior concentração de biocarvão, mas também maior quantidade de água, já que a primeira perda massa (~120 °C) também é significativamente maior que as demais frações.

Entretanto, em comparação com o biocarvão BCal6, todas as frações apresentaram concentrações de carbono muito abaixo da média anterior, um indicativo que o biocarvão desta fonte é consideravelmente mais rico em matéria inorgânica.

Assim como para as análises do BCal6, uma tabela foi desenvolvida a partir do estudo destas análises termogravimétricas com o intuito de apresentar de forma mais clara as informações coletadas. Na tabela 5, observa-se ainda a porcentagem de carbono presente, calculada a partir da diferença entre a perda total de massa registrada após o aquecimento a 800 °C e a perda de água determinada após o aquecimento a 120 °C. Essa metodologia

considera que toda a perda de massa que não está relacionada à desidratação da amostra é atribuída à oxidação do carbono. Essa consideração é justificada pela natureza dos materiais analisados, uma vez que o biocarvão já passou por um processo de queima e carbonização da sua biomassa.

Portanto, pode-se considerar que a perda de massa observada durante a análise termogravimétrica reflete a quantidade de carbono que foi oxidada durante o aquecimento.

Tabela 5 – Compilado de dados TG para BCo23, amb. ~ 120 °C e amb. ~ 800 °C

Dados	PC7	PC6	PC5	PC4	PC3	PC2	PC1
% de H ₂ O	5,43	2,67	2,30	1,57	0,47	1,35	4,63
% Carvão	18,54	8,21	5,34	2,83	2,18	5,70	6,78
% Inorgânico	76,03	89,12	92,37	95,60	97,35	92,94	88,59
% Perda total	23,97	10,88	7,63	4,40	2,65	7,06	11,41

Fonte: Autor, 2024

5.4. Análises espectrométricas

Através da análise de EDX foi possível identificar os principais elementos presentes nos biocarvões, na Tabela 6 estes elementos foram descritos e na Figura 10 apresenta um múltiplo gráfico de barras a fim de facilitar a comparação entre as frações e fontes.

Os elementos majoritários (>10%) foram Si, Ca e K, e dentro destes o Si foi o que mais se destacou chegando a aproximadamente 90% em algumas frações.

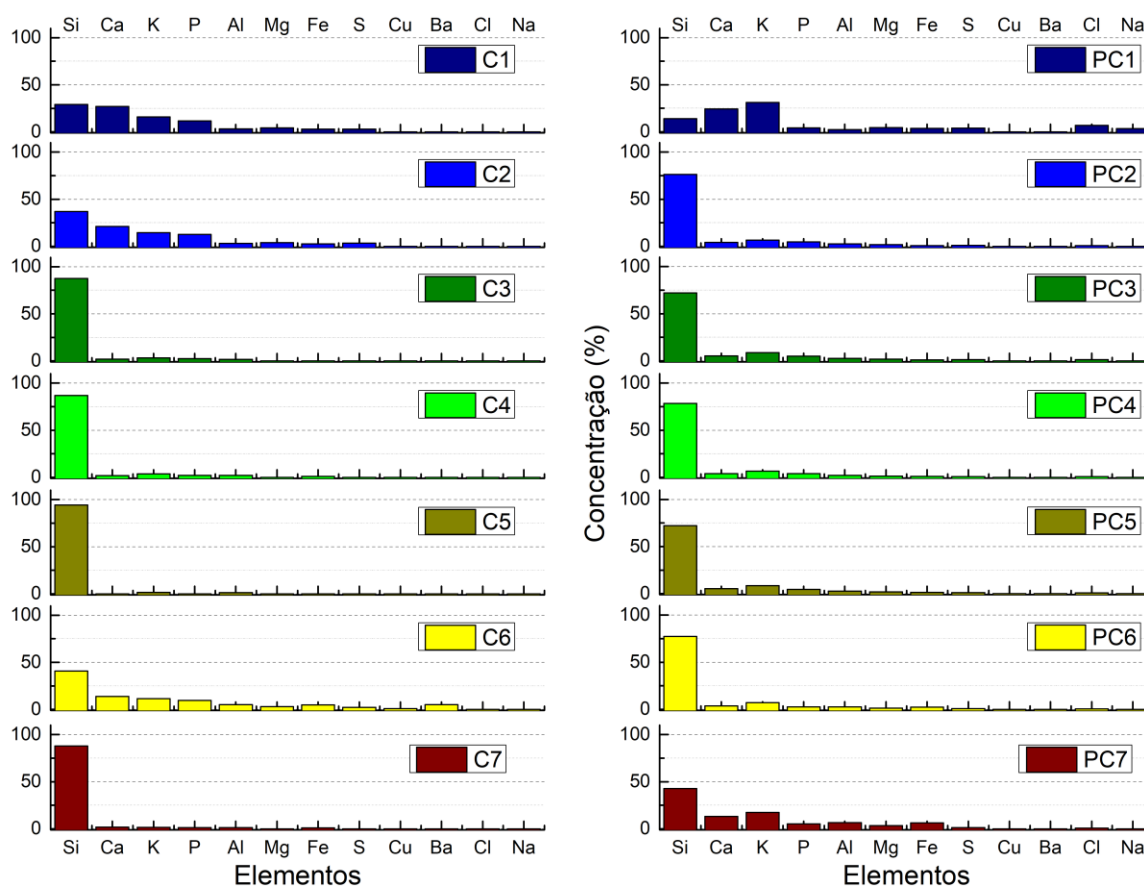
Tabela 6 – Resultado de EDX para todas as frações

Elemento (%)	BCa16							BCo23						
	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	PC7	PC6	PC5	PC4	PC3	PC2	PC1
Si	87,9	40,7	94,1	87,0	87,4	36,8	29,3	42,7	77,4	72,1	78,5	72,1	76,4	14,0
Ca	1,8	13,7	0,0	1,9	2,0	21,2	27,0	13,2	3,6	5,3	3,9	5,3	4,3	24,1
K	1,7	11,4	1,5	3,6	3,3	14,6	16,0	17,5	7,0	8,7	6,7	8,7	6,6	31,1
P	1,2	9,5	0,0	2,0	2,5	12,5	11,6	5,3	2,7	4,7	4,0	4,9	4,7	4,1
Al	1,4	5,2	1,2	2,2	1,7	3,3	3,3	6,5	2,6	2,7	2,2	2,7	2,7	2,5
Mg	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	3,8	4,4	3,5	1,3	2,0	1,4	1,9	1,8	4,6
Fe	1,1	5,0	0,0	1,1	0,0	2,7	3,0	6,3	2,3	1,4	0,9	1,0	0,9	3,7
S	0,0	2,3	0,0	0,0	0,0	3,3	3,0	1,3	0,7	1,2	0,9	1,3	1,1	3,9
Cu	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ba	0,0	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,4	0,9	0,8	1,2	0,7	7,0
Na	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4
Outros*	3,4	1,2	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	2,8	1,9	1,1	0,7	0,9	0,7	1,6

Fonte: Autor, 2024

* Somatório de elementos com menos de 1%.

Figura 10 – Comparação de concentração de elementos entre frações



Fonte: Autor, 2024

Considerando a concentração de carvão presente nas frações definidas pelas análises térmicas, pode-se definir uma porcentagem dos elementos levando em consideração o carbono gerando então novas porcentagens, estas estão dispostas na tabela 7.

Com base na literatura e devido à natureza das amostras, esses elementos encontram-se em suas formas oxidadas, como descrito por Cacuro e Waldman (2015); Rajasekar et al. (2018); Schettino e Holanda (2015), para ainda confirmar a análise de DRX se faz necessária como complemento para essa afirmação.

Uma análise dos valores de $K\alpha$, $K\beta$, $L\alpha$, $L\beta$ descritos nos resultados das análises foi feita para confirmar a presença de elementos não esperados como Cu e Ba.

Tabela 7 – Resultado de EDX considerando carbono TG

Elementos (%)	BCa16							BCo23						
	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1	PC7	PC6	PC5	PC4	PC3	PC2	PC1
C	66,3	12,3	3,4	2,1	8,6	54,4	80,7	18,5	8,2	5,3	2,8	2,2	5,7	6,8
Si	29,6	35,7	91,0	85,2	79,8	16,8	5,6	34,8	77,1	68,9	78,5	71,4	76,4	13,8
Ca	0,6	12,1	0,0	1,8	1,8	9,6	5,2	10,8	3,6	5,0	3,9	5,2	4,3	23,8
K	0,6	10,0	1,5	3,5	3,0	6,6	3,1	14,3	7,0	8,3	6,7	8,6	6,6	30,7
P	0,4	8,4	0,0	1,9	2,3	5,7	2,2	4,4	2,7	4,5	4,0	4,9	4,7	4,1
Al	0,5	4,5	1,2	2,1	1,6	1,5	0,6	5,3	2,6	2,6	2,2	2,6	2,7	2,4
Mg	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	1,8	0,8	2,8	1,3	1,9	1,4	1,9	1,8	4,5
Fe	0,4	4,4	0,0	1,0	0,0	1,2	0,6	5,2	2,3	1,3	0,9	1,0	0,9	3,7
S	0,0	2,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,6	1,1	0,7	1,1	0,9	1,3	1,1	3,8
Cu	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ba	0,0	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cl	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,4	0,9	0,8	1,2	0,7	6,9
Na	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4
Outros*	1,2	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	2,3	1,9	1,1	0,7	0,9	0,7	1,6

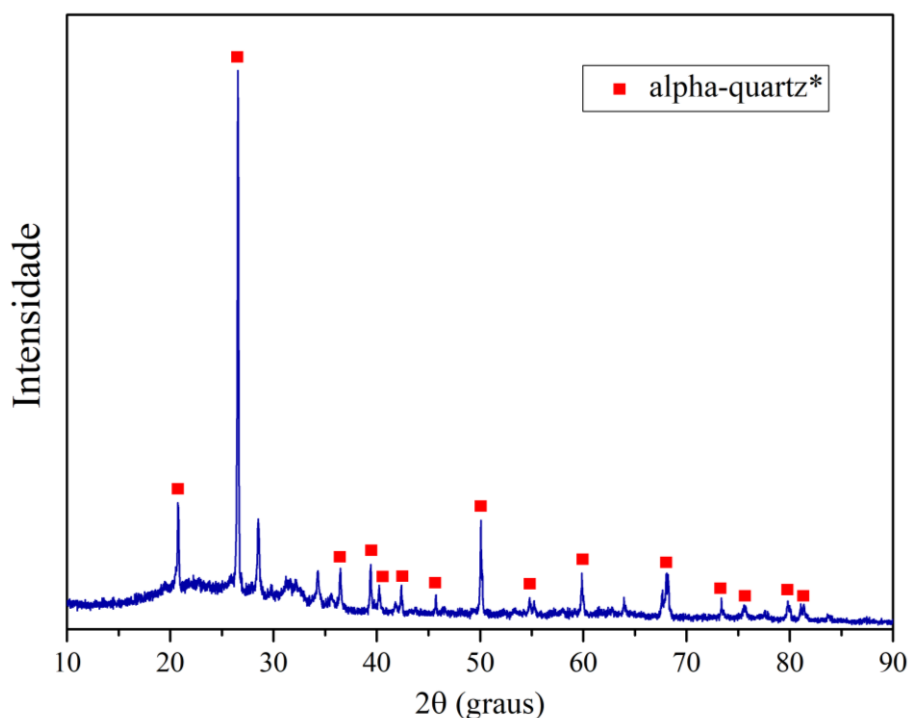
Fonte: Autor, 2024

* Somatório de elementos com menos de 1%

5.5. Análise de difração de raio-X

Na figura 11 o difratograma da amostra PC7 após queima, denominada PC7-PTG, nesta pode-se observar que a principal fase cristalina é alpha-quartz, descrita por D'Amour, Denner e Schulz (1979), a presença de quartz era esperada, uma vez que amostra tem como elemento majoritário no material inorgânico a Si, e devido as condições de aquecimento da amostra tanto na análise de TG como na obtenção do biocarvão.

A identificação da fase cristalina foi realizada através da base de estruturas cristalinas BDEC com o acesso CAPES, na base de dados cristalográfica ICSD - Inorganic Crystal Structure Database, e com os dados de EDX realizados anteriormente, que permitiram identificar os elementos presentes direcionando a busca definindo a fase cristalina através da posição dos picos e relação de intensidade dos três picos mais intensos.

Figura 11 – Difratoograma de PC7-PTG

Fonte: Autor, 2024

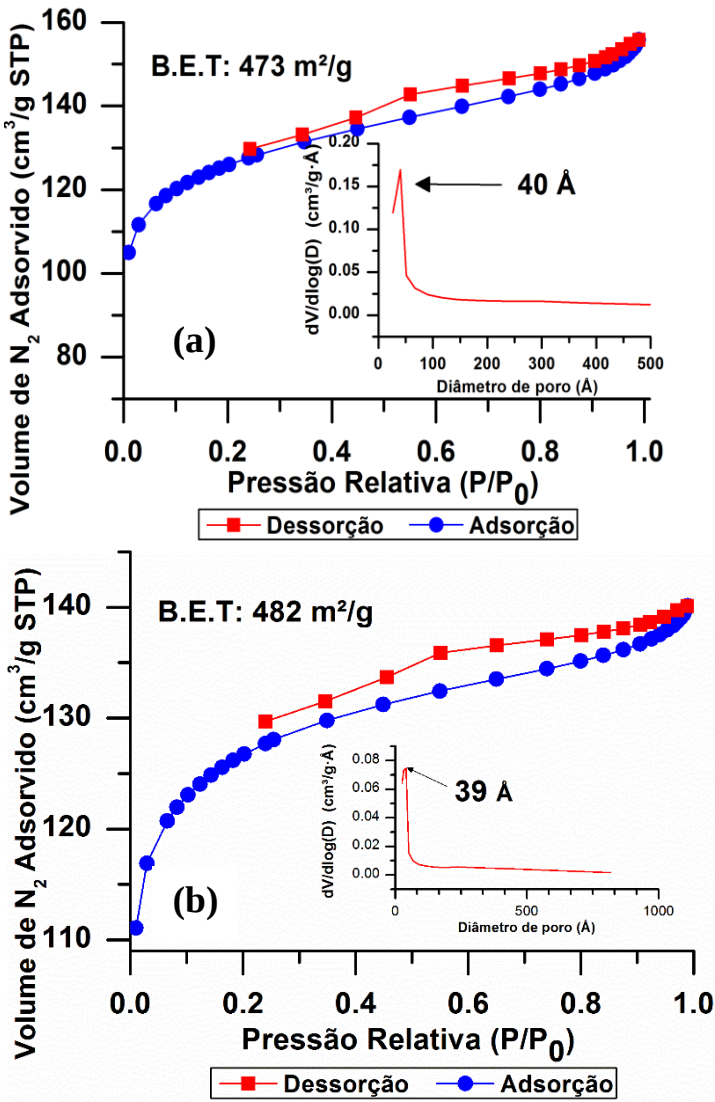
*(D'Amour, Denner e Schulz 1979)

Pode-se observar ainda a cristalinidade da amostra, com um difratograma com picos acentuados e bem definidos, característicos de sólido cristalinos, a retirada do biocarvão antes da análise foi fundamental para essa resolução, já que a presença deste poderia atrapalhar a visualização de alguma fase cristalina menos intensa.

5.6. Análise de fisissorção de nitrogênio

Para ambas as análises texturais obtiveram isotermas tipo II para o sólido C1 e C7, estes apresentaram uma área específica de $482 \text{ m}^2 / \text{g}$ e $473 \text{ m}^2 / \text{g}$, respectivamente, e uma distribuição de diâmetro de poro mono-nodal de 39 e 40 Å. Apesar das semelhanças, o volume adsorvido total em $p > 0.8$, foi pouco maior para C7, essa capacidade adsortiva pode ser dada devido seu menor diâmetro de partícula. As áreas encontradas podem ser consideradas altas devido à natureza das amostras, em vista que estas não passaram por qualquer ativação química ou física. As isotermas apresentam ainda uma histerese do tipo H4, características de sólidos microporosos.

Figura 12 – Gráfico de Adsorção/Dessorção C1 (a) e C7 (b)



Fonte: Autor, 2024

6. CONCLUSÃO

Utilizar a granulometria para fracionar a amostra inicialmente se mostrou muito eficiente para esse tipo de trabalho, considerando que uma amostra real com diferentes tamanhos de partículas apresenta características distintas para cada fração e esta técnica permite o estudo individual de toda a extensão da amostra.

O desenvolvimento de um sistema de purificação se mostrou necessário como alternativa a métodos químicos como dissolução parcial, que se utilizam de reagentes potencialmente nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, e como proposta deste sistema de purificação é a não utilização de reagentes químicos, utilizando apenas interações físicas promovendo uma purificação eficiente e limpa.

As análises térmicas foram fundamentais para a caracterização destes sólidos, resultados de fácil leitura e interpretação, relativamente barata e fácil de ser realizada, o que permite que seja amplamente utilizada na caracterização de sólidos. Obtendo os resultados de concentração de carvão, chegando a 80% para as mais puras e 2% para as menos puras. Através ainda das análises termodiferenciais, podemos identificar a natureza das perdas de massa, podendo definir a que reação está pertence, conseguindo assim precisar a quantidade de água presente, por exemplo, e até mesmo identificar biopolímeros contidos nas amostras.

Em complemento as análises térmicas, as espectrométricas permitiram identificar elementos presentes, tendo Si e Ca como elementos majoritários na matéria inorgânica das amostras, que possibilitaram ações mais assertivas no desenvolvimento do sistema de purificação.

O conhecimento das áreas específicas de até 482 m²/g são um indicativo promissor para aplicação destes biocarvões em atividades futuras, como adsorventes de contaminantes ou até mesmo em reações catalíticas, aplicações já muito exploradas na literatura.

REFERÊNCIAS

ADENIYI, ADEWALE GEORGE et al. Metal oxide rich char from muffle furnace and retort heated reactor treated cow bone. **Cleaner Engineering and Technology**, [s. l.], v. 8, ed. 100485, 6 abr. 2022.

AJALA, E. O. et al. Sugarcane bagasse: a biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. **Bioresources and Bioprocessing**, [s. l.], v. 8, n. 87, 15 set. 2021.

BETHKE, KEVIN et al. Functionalized cellulose for water purification, antimicrobial applications, and sensors. **Advanced Functional Materials**, v. 28, n. 23, p. 1800409, 2018.

BHATIA, SHASHI KANT et al. Trends in renewable energy production employing biomass-based biocarvão. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 340, 1 nov. 2021.

BONI, MARIA ROSARIA; COPELLI, SABRINA; RABONI, MASSIMO. Study of the performance of disinfection with sodium hypochlorite on a full-scale sewage treatment plant. **Environment & Water - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s. l.], v. 15, 13 out. 2020.

CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. *Cinzas da Queima de Biomassa: Aplicações e Potencialidades*. **Rev. Virtual Quim.**, 2015, 7 (6), 2154-2165

CAMARGO, JÚLIA M.O. et al. Characterization of sugarcane straw and bagasse from dry cleaning system of sugarcane for cogeneration system. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 158, p. 500-508, 1 out. 2020.

CHAO, LI; ZHANG, CHENTING; ZHANG, LIJUN; GHOLIZADEH, MORTAZA; HU, XUN. Catalytic pyrolysis of tire waste: Impacts of biocarvão catalyst on product evolution. **Waste Management**, [s. l.], v. 116, p. 9-21, 1 out. 2020.

CHEN, Ming-Jie et al. Homogeneous Transesterification of Sugar Cane Bagasse toward Sustainable Plastics. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [s. l.], p. 360-366, 19 nov. 2019.

CHEN, X.; YAN, N. A brief overview of renewable plastics. **Materials Today Sustainability**, [s. l.], v. 8, 14 dez. 2019.

CHENG, BIN-HAI; ZENG, RAYMOND J.; JIANG, HONG. Recent developments of post-modification of biocarvão for electrochemical energy storage. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 246, p. 224-233, 1 dez. 2017.

D'AMOUR, H.; DENNER, W.; SCHULZ, H. Structure determination of alpha-quartz up to 68×10^8 Pa. **Acta Crystallographica, Section B: Structural Crystallography and Crystal Chemistry**, [s. l.], n. 35, p. 550-555, 1979.

EA, International Energy Agency. Global Energy and Climate Model. **Documentation - 2024**, [s. l.], out. 2024.

ELLIOTT, ALLAN; MAHMOOD, TALAT; KAMAL, ABU. Boiler ash utilization in the Canadian pulp and paper industry. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 319, 1 out. 2022.

FRAGA, LELIS GONZAGA et al. The Potential of Renewable Energy in Timor-Leste: An Assessment for Biomass. **Energies**, [s. l.], v. 12, ed. 8, 15 abr. 2019.

FU, HUI; ZHANG, JUNFENG; HUANG, YAN; ZHAO, LINGKUI. Ammonia-free selective catalytic reduction of NO by coal-based activated carbon supported Cu-Mn oxides at low temperature. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 12, 1 out. 2024.

FU, YANG et al. The effect of Ni particle size and carbon support on catalytic activity for glucose hydrogenation reaction. **Applied Catalysis A: General**, [s. l.], v. 644, 25 ago. 2022.

GRZYBEK, T. et al. Nitrogen-promoted active carbons as catalytic supports: 2. The influence of Mn promotion on the structure and catalytic properties in SCR. **Catalysis Today**, [s. l.], v. 137, p. 235-241, 30 set. 2008.

HANSTED, ANA LARISSA SANTIAGO et al. Industrial waste from biomass boiler: Ash as a liming replacement for Eucalyptus planting in Brazil. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 202, 15 out. 2023.

IWUOZOR, K. O. et al. Adsorption of organophosphate pesticides from aqueous solution: a review of recent advances. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v. 20, p. 5845-5894, 31 jul. 2022.

IWUOZOR, KINGSLEY O. et al. Valorization of Sugar Industry's By-products: A Perspective. **Sugar Tech**, [s. l.], v. 24, p. 1052-1078, 11 abr. 2022.

KAMBOJ, Ajay *et al.* Unravelling the potential of sugarcane bagasse: An eco-friendly and inexpensive agro-industrial waste for the production of valuable products using pretreatment processes for sustainable bio-economy. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], 14 out. 2024.

KUSUMA, Heri Septya *et al.* Sugarcane bagasse as an environmentally friendly composite material to face the sustainable development era. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [S. l.], v. 14, p. 26693–26706, 16 jan. 2023.

LIAO, WENXI; THOMAS, SEAN C. Biocarvão Particle Size and Post-Pyrolysis Mechanical Processing Affect Soil pH, Water Retention Capacity, and Plant Performance. **Soil Systems**, [s. l.], v. 3, 14 fev. 2019.

MARTÍN-JIMÉNEZ, F. JAVIER et al. Exploring the possibilities of carbon materials as catalytic supports for partial oxidation reactions. **Catalysis Today**, [s. l.], v. 356, p. 38-48, 1 out. 2020.

MISHRA, RANJEET KUMAR; MOHANTY, KAUSTUBHA. A review of the next-generation biocarvão production from waste biomass for material applications. **Science of the Total Environment**, v. 904, p. 167171, 15 dez. 2023.

MONTEIRO, SERGIO N.; CANDIDO, VERONICA S.; BRAGA, FABIO O.; BOLZAN, LUCAS T.; WEBER, RICARDO P.; DRELICH, JAROSLAW W. Sugarcane bagasse waste in composites for multilayered armor. **European Polymer Journal**, [s. l.], v. 78, p. 173-185, 1 maio 2016.

MUNOZ, MACARENA et al. Polymer-based spherical activated carbon as catalytic support for hydrodechlorination reactions. **Applied Catalysis B: Environmental**, [s. l.], v. 218, p. 498-505, 5 dez. 2017.

OBA, R.B. et al. Intake, digestibility, growth performance and blood profile of rams fed sugarcane bagasse or rice husk treated with *Trichoderma viride* and effective microorganisms. **Heliyon**, [s. l.], 19 nov. 2022.

OBIA, ALFRED et al. The potential of biocarvão in improving drainage, aeration and maize yields in heavy clay soils. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 13, 11 maio 2018.

OGEMDI, IWUOZOR KINGSLEY. Combustion of Wood by Pyrolysis: A Review. **International Journal of Atmospheric and Oceanic Sciences**, [s. l.], v. 3, 31 jan. 2019.

ONN, Munirah *et al.* Free Fatty Acid Reduction in Used Frying Oil via Bio Adsorbent: A Short Review. **CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS**, [s. l.], v. 106, 29 ago. 2023.

PAN, Shiyu et al. Technoeconomic and environmental perspectives of biofuel production from sugarcane bagasse: Current status, challenges and future outlook. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], 15 nov. 2022.

RAJASEKAR, A.; ARUNACHALAM, K.; KOTTAISAMY, M.; SARASWATHY, V. Durability characteristics of Ultra High Strength Concrete with treated sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, [S. l.], p. 350-356, 20 maio 2018.

RAZZAGHI, FATEMEH; OBOUR, PETER BILSON; ARTHUR, EMMANUEL. Does biocarvão improve soil water retention, A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**, [s. l.], v. 361, 1 mar. 2020.

ROSALES-CALDERON, OSCAR; ARANTES, VALDEIR. A review on commercial-scale high-value products that can be produced alongside cellulosic ethanol. **Biotechnology for biofuels**, v. 12, n. 1, p. 240, 2019.

SADH, Pardeep Kumar et al. Recovery of agricultural waste biomass: A path for circular bioeconomy. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 870, p. 161904, 20 abr. 2023.

SALES, ALMIR; LIMA, SOFIA ARAÚJO. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, [s. l.], v. 30, p. 1114-1122, 1 jun. 2010.

SARKAR, DEEPAJ et al. A comprehensive review of production and characterization of biocarvão for removal of organic pollutants from water and wastewater. **Water-Energy Nexus**, v. 7, p. 243-265, dez. 2024.

SCHETTINO, MYRIAN APARECIDA S.; HOLANDA, JOSÉ NILSON F. Characterization of Sugarcane Bagasse ash Waste for Its Use in Ceramic Floor Tile. **Procedia Materials Science**, [S. l.], p. 190-196, 2015.

SKOOG, DOUGLAS A.; HOLLER, F. JAMES; NIEMAN, TIMOTHY A. Espectrometria Atômica de Raios X. *In*: SKOOG, Douglas A.; HOLLER, F. James; NIEMAN, Timothy A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. cap. 12, p. 252-272. ISBN 978-85-7307-976-0.

TARDY, BLAISE L. et al. Deconstruction and reassembly of renewable polymers and biocolloids into next generation structured materials. **Chemical reviews**, v. 121, n. 22, p. 14088-14188, 2021.

WANG, DAOYUAN et al. Impact of biocarvão on water retention of two agricultural soils – A multi-scale analysis. **Geoderma**, [s. l.], v. 340, p. 185-191, 15 abr. 2019.

WANG, ZIHENG; SEDIGHI, MAJID; LEA-LANGTON, AMANDA. Filtration of microplastic spheres by biocarvão: removal efficiency and immobilisation mechanisms.

Water Research, v. 184, p. 116165, 1 out. 2020.

WAZIRI, S. A.; MUSTAPHA, M. Efficacy of sugarcane bagasse and rice husk adsorbent for treatment of heavy metals from petroleum refinery effluent. **Arid zone journal of engineering, technology & environment**, [s. l.], v. 20, p. 343-356, jun. 2024.

WINTER, A. et al. Reduced polarity and improved dispersion of microfibrillated cellulose in poly (lactic-acid) provided by residual lignin and hemicellulose. **Journal of materials science**, v. 52, p. 60-72, 2017.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION et al. Global biomass potential towards 2035. **World bioenergy Assoc. Factsheet**, p. 6, 2016.

XIE, YONGMIN et al. High-performance gas–electricity cogeneration using a direct carbon solid oxide fuel cell fueled by biocarvão derived from camellia oleifera shells. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 45, p. 29322-29330, 30 out. 2020.

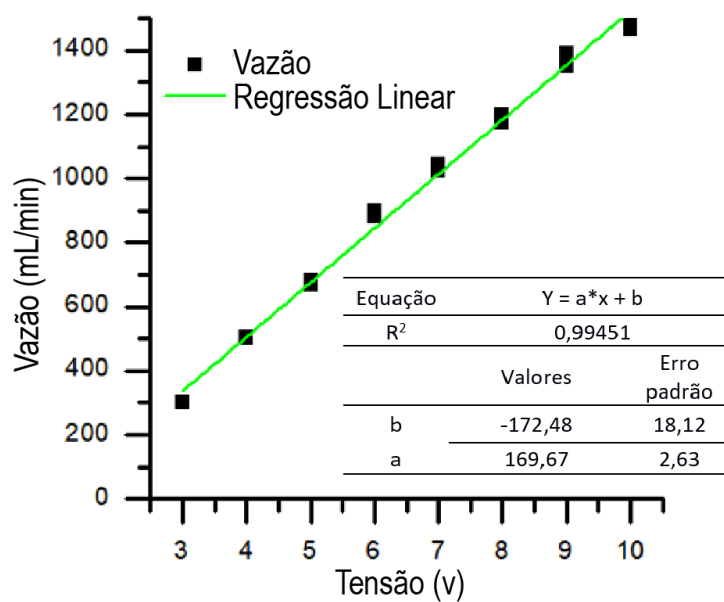
YU, JIANGANG et al. Adsorption of methyl orange dye onto biocarvão adsorbent prepared from chicken manure. **Water Science & Technology**, [s. l.], v. 77, 4 jan. 2018.

ZHANG, CHEN et al. Biocarvão for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 373, p. 902-922, 1 out. 2019.

ZHANG, JIE; GU, MIN; CHEN, XI. Supercapacitors for renewable energy applications: A review. **Micro and Nano Engineering**, [s. l.], v. 21, 1 dez. 2023.

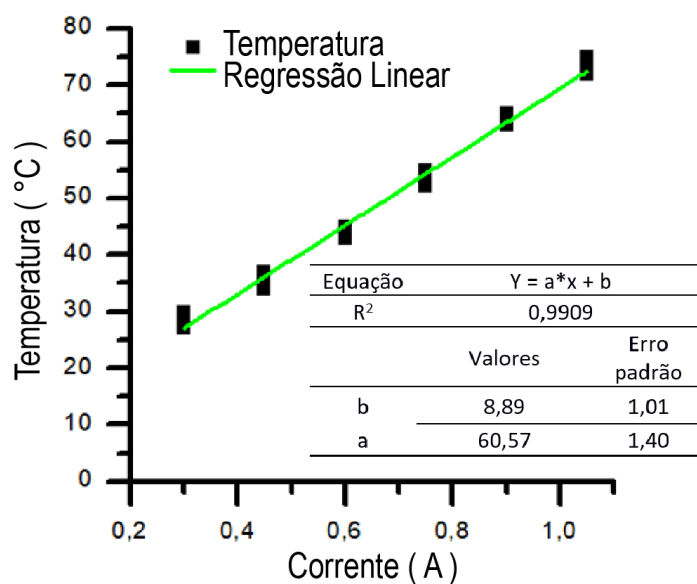
APÊNDICE A – regressões lineares de calibração de módulos auxiliares

Figura 13 – Regressão linear vazão/tensão modulo 1



Fonte: Autor, 2024

Figura 14 – Regressão linear Temperatura/Corrente Modulo 2



Fonte: Autor, 2024