



**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS**



ADONAI DOS SANTOS NEVES

**ANÁLISE TÉCNICA DA RECUPERAÇÃO DO CARVÃO PARA FINS
DE ATIVAÇÃO DE ESCOVAS ROTATIVAS DESCARTADAS DE
MOTORES ELÉTRICOS**

VOLTA REDONDA

2024

ADONAI DOS SANTOS NEVES

**ANÁLISE TÉCNICA DA RECUPERAÇÃO DO CARVÃO PARA FINS
DE ATIVAÇÃO DE ESCOVAS ROTATIVAS DESCARTADAS DE
MOTORES ELÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, na área de concentração de processamento e caracterização de materiais poliméricos e linha de pesquisa em materiais compósitos com fibras naturais.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga
Palmeira

Co-orientador: Prof. Dr. Monique Osório Talarico
da Conceição

VOLTA REDONDA

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

N518a Neves, Adonai dos Santos

Análise técnica da recuperação do carvão para fins de ativação de escovas rotativas descartadas de motores elétricos. / Adonai dos Santos Neves. - Volta Redonda: UniFOA, 2024. 55 p. II

Orientador (a): Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Coorientador (a): Prof.^a Dr.^a Monique Talarico da Conceição

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2024

1. Materiais - dissertação. 2. Beneficiamento. 3. Escova rotativa. 4. Carvão ativado 5. Ensaio BET. I. Palmeira, Alexandre Alvarenga. II. Conceição, Monique Talarico. III. Centro Universitário de Volta Redonda. IV. Título.

CDD – 620.1



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS



ADONAI DOS SANTOS NEVES

ANÁLISE TÉCNICA DA RECUPERAÇÃO DO CARVÃO PARA FINS DE
ATIVÇÃO DE ESCOVAS ROTATIVAS DESCARTADAS DE MOTORES
ELÉTRICOS

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
“MESTRE EM MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM MATERIAIS

Roberto de Oliveira Magnago

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira
Presidente / UniFOA

Cirlene Fourquet Bandeira

Prof.^a Dr.^a Cirlene Fourquet Bandeira
Examinador interno / UniFOA

Lucas de Mendonça Neuba

Prof. Dr. Lucas de Mendonça Neuba
Examinador externo / IME

Dezembro de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste. Especialmente à minha família, minha esposa Andréa e meus filhos Guilherme e Francisco pela paciência e entendimento pelos meus momentos de ausência. A meus pais, pela educação e formação que deles recebi, onde, apesar de todas as dificuldades que surgiram pelo caminho, sempre me deram o melhor exemplo que poderia receber.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Denise de Souza, engenheira eletricista especialista em escovas rotativas de motores elétricos, por dividir comigo parte de seu conhecimento em escovas rotativas, seus modelos e aplicações.

Ao meu irmão e amigo Alden pelo incentivo na realização do mestrado.

Ao meu orientador Alexandre Alvarenga Palmeira e à minha co-orientadora Monique Osório Talarico da Conceição pela dedicação na orientação deste trabalho.

NEVES, A. S. **Análise técnica da recuperação do carvão para fins de ativação de escovas rotativas descartadas de motores elétricos**. 2024. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2024.

RESUMO

O presente trabalho desenvolve uma rota tecnológica para transformar o grafite e outros componentes dessas escovas em materiais de alto valor agregado, como carvão ativado, utilizado em diversas aplicações industriais e ambientais. Para é feita a desmontagem e moagem das escovas para separação dos componentes. O grafite bruto é então submetido à lixiviação com água régia para a remoção de cobre, cuja eficácia foi confirmada por análises de difração de raios-X (DRX). Após esse processo, o material restante consiste predominantemente em carbono, livre de contaminação metálica. A etapa seguinte envolveu a ativação química do carbono, utilizando cloreto de zinco ($ZnCl_2$) e um forno com atmosfera controlada de nitrogênio. Esse tratamento promoveu o desenvolvimento de microporos e mesoporos no material, características essenciais para a adsorção de moléculas. As amostras tratadas foram analisadas quanto à área superficial específica, teor de cinzas e volumes de microporos e mesoporos, utilizando técnicas como isotermas BET. CP 02 foi a amostra que apresentou os melhores resultados, com área superficial de $655 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e volumes equilibrados de poros, tornando-a ideal para aplicações como filtração e purificação de líquidos e gases. Comparativamente, CP 01 apresentou características satisfatórias, mas inferiores a CP 02, com menor área superficial ($563 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$) e volumes ligeiramente reduzidos de poros. Por outro lado, CP 03 demonstrou limitações significativas, como elevado teor de cinzas (2,45%) e baixo volume de mesoporos ($0,05 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$), restringindo suas aplicações em processos que demandam alta eficiência.

Palavras-chave: beneficiamento, escova rotativa, carvão ativado, lixiviação, ensaio BET.

NEVES, A. S. **Technical analysis of coal recovery for the purpose of activating discarded rotating brushes from electric motors**. 2024. Dissertation (Professional Master's Degree in Materials) – Oswaldo Aranha Foundation, Volta Redonda University Center, Volta Redonda, 2024.

ABSTRACT

This work develops a technological route to transform graphite and other components of these brushes into high-value materials, such as activated carbon, used in various industrial and environmental applications. To do this, the brushes are disassembled and ground to separate the components. The raw graphite is then subjected to leaching with aqua regia to remove copper, the effectiveness of which was confirmed by X-ray diffraction (XRD) analysis. After this process, the remaining material consists predominantly of carbon, free of metallic contamination. The next step involved the chemical activation of the carbon, using zinc chloride ($ZnCl_2$) and a furnace with a controlled nitrogen atmosphere. This treatment promoted the development of micropores and mesopores in the material, essential characteristics for the adsorption of molecules. The treated samples were analyzed for specific surface area, ash content, and volumes of micropores and mesopores, using techniques such as BET isotherms. CP 02 was the sample that presented the best results, with a surface area of $655 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ and balanced pore volumes, making it ideal for applications such as filtration and purification of liquids and gases. Comparatively, CP 01 presented satisfactory characteristics, but inferior to CP 02, with a smaller surface area ($563 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$) and slightly reduced pore volumes. On the other hand, CP 03 demonstrated significant limitations, such as high ash content (2.45%) and low mesopore volume ($0.05 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$), restricting its applications in processes that demand high efficiency.

Keywords: beneficiation, rotary brush, activated carbon, leaching, BET test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Motor elétrico industrial visto em corte	18
Figura 2: Partes de um motor elétrico de corrente contínua	20
Figura 3: Escova MERSEN modelo EG300T	22
Figura 4: Exemplo de classificação dos poros no carvão ativado	27
Figura 5: Escova MERSEN modelo EG300T	34
Figura 6: Metodologia desenvolvida na realização do trabalho.....	35
Figura 7: Peneira, marca VEB Metallweberei Neustadt-Orla, 2,5 mm.....	36
Figura 8: Carbono moído misturado em água régia no agitador.	37
Figura 9: Filtragem do carvão após lixiviação.	38
Figura 10: Material após lixiviação pronto para ser ativado.	39
Figura 11: Curva temperatura x % de massa.	40
Figura 12: Difratoograma de raios-X da amostra como recebida.	43
Figura 13: Difratoograma de raios-X da amostra após lixiviação.	44
Figura 14: Difratoograma de raios-X da amostra após lixiviação.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação de Poros (IUPAC).....	26
Tabela 2: Classificação dos poros de um adsorvente.....	27
Tabela 3: Reagentes x Área de Superfície e Volume de Poros.	31
Tabela 4: Valores obtidos do carvão ativado pelo ensaio BET.	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CO ₂	Gás Dióxido de Carbono
H ₂	Gás Hidrogênio ou Hidrogênio Molecular
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
MeMat	Mestrado Profissional em Materiais
MOFs	Metal Organic Frameworks (Estruturas orgânicas de metal)
PSA	Pressure Swing Adsorption (Método de adsorção de pressão modulada)
PSD	Pore Size Distribution (Distribuição do Tamanho dos Poros)
TSA	Temperature Swing Adsorption (Método de adsorção de temperatura modulada)
VSA	Vacuum Swing Adsorption (Método de adsorção de vácuo modulado)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO	15
1.1.1. Objetivos Específicos	15
1.2. JUSTIFICATIVA	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. Motores Elétricos Industriais	17
2.1.1. Motores elétricos de corrente contínua	19
2.2. ESCOVAS ROTATIVAS.....	21
2.3. CARVÃO ATIVADO	23
2.3.1. PREPARAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO	25
2.3.2. Ativação Química	28
a) Cloreto de Zinco (ZnCl₂)	29
b) Ácido Fosfórico (H₃PO₄)	29
c) Cloreto de Alumínio (AlCl₃)	29
d) Cloreto de Magnésio (MgCl₂)	30
e) Hidróxido de Potássio (KOH)	30
f) Hidróxido de Sódio (NaOH)	30
2.4. PROCESSO DE LIXIVIAÇÃO DO COBRE	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1.1. MATERIAIS	34
3.1.2. MÉTODOS	35
a) Seleção e Desmontagem das Escovas	35

b) Moagem e Peneiramento das Escovas	36
c) Segregação Cobre-Carvão	37
d) Ativação química do carbono	39
e) Teste de Caracterização do material ativado para Adsorção de Gases	39
f) Análise Termogravimétrica (TGA)	40
g) Ensaio para medição da área superficial a partir do método BET (Brunauer, Emmet and Teller)	40
h) Caracterização por Difração de Raios-X (DRX)	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1. MOAGEM DO MATERIAL	42
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ANTES DA EXTRAÇÃO DO COBRE	42
4.3. EXTRAÇÃO DO COBRE	43
4.4. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL APÓS A EXTRAÇÃO DO COBRE	44
4.5. ATIVAÇÃO DO CARBONO	46
5. CONCLUSÕES	49
6. TRABALHOS FUTUROS	50
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, muitos países estão implementando e promovendo os conceitos de desenvolvimento sustentável e economia verde, a fim de reduzir a carga antropogênica no ambiente. Uma área de atividade mais restrita para combinar os objetivos de crescimento econômico e utilização racional dos recursos naturais é a economia circular. Vários países desenvolveram e adotaram por política abrangente para a implementação dos princípios da economia circular, graças à qual a configuração dos processos de produção em muitas indústrias está mudando a forma de se tratar a produção e principalmente o produto (OLIVEIRA, et al. 2019).

De acordo com Gonçalves, et. al. (2019) o conceito de economia circular, em contraste com o mecanismo tradicional de utilização descartável de recursos, visa preservá-los através de uma utilização mais prolongada através da recuperação e retorno à produção. Com os fundamentos teóricos da economia ambiental, o retorno dos materiais à produção permite resolver dois problemas: o aumento dos custos de extração dos minerais (devido ao seu esgotamento gradual e a extração cada vez mais difícil do subsolo) e o aumento dos custos associados à eliminação de resíduos. devido ao aumento da densidade populacional e ao menor volume de terras disponíveis para fins de eliminação de resíduos.

Sendo assim, de acordo com Oliveira *et. al.* (2019), o modelo de economia circular é projetado para minimizar a geração de resíduos. Para o Brasil, mesmo sendo exportador de uma vasta gama de recursos naturais e, portanto, dependente das flutuações dos preços nos mercados mundiais de mercadorias, o desenvolvimento de uma economia circular é extremamente importante, pois para se evitar o o problema do esgotamento dos recursos naturais, em consequência da actividade humana, consiste em estabelecer proporções razoáveis entre o volume do consumo de recursos e o volume do seu aumento natural como resultado resultado de cada ciclo de reprodução.

A gestão eficiente do consumo de matérias-primas é essencial para garantir a competitividade da indústria, além de promover o desenvolvimento sustentável. Empresas que adotam práticas responsáveis não apenas reduzem custos, mas também atendem às exigências regulatórias e conquistam consumidores mais

conscientes. Ou seja, o consumo de matérias-primas na indústria é um processo indispensável, mas que exige planejamento e inovação para equilibrar as demandas de produção com a preservação dos recursos naturais e o bem-estar ambiental (SILVA, 2021).

Toda e qualquer planta industrial faz uso de motores elétricos como os principais mecanismos de conversão de energia em torque e movimento. Os motores elétricos industriais convertem energia elétrica em mecânica, movendo máquinas e sistemas essenciais em diversos setores. Funcionam pela interação de campos magnéticos, gerando torque para girar o rotor. Eles são classificados em motores de corrente alternada (CA), amplamente usados por sua eficiência, e de corrente contínua (CC), conhecidos pelo controle preciso de velocidade e torque.

Esses motores são aplicados em manufatura, processos industriais, automação, sistemas de climatização, mineração, construção e geração de energia. Suas vantagens incluem eficiência energética, longa vida útil, baixa manutenção e alta confiabilidade. Com tecnologias modernas, oferecem maior controle e adaptabilidade, sendo fundamentais para operações industriais eficientes e sustentáveis.

Nos motores elétricos, as escovas rotativas são responsáveis por conduzir a energia das bobinas (ou estatores) ao rotor (ou induzido). As escovas são utilizadas em motores que necessitam de mais torque, tais como: parafusadeiras, lixadeiras, furadeiras, esmerilhadeiras, polítrizes, serras circular, serras de fita, serras tico-tico, entre outros. Após o término de sua vida útil, o material restante destas escovas rotativas é descartado, porém podendo ser reaproveitado para diversos outros fins.

1.1. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho recuperar e beneficiar o carvão descartado das escovas rotativas de motores elétricos e sua conversão em carvão ativado.

1.1.1. Objetivos Específicos

O objetivos específicos do presente trabalho são:

1. Desenvolver uma rota de recuperação e beneficiamento das escovas rotativas utilizadas em motores elétricos convertendo em carvão ativado;
2. Verificar a eficácia do beneficiamento do carvão oriundo das escovas rotativas ao ser ativado;
3. Avaliar a qualidade do carvão ativado oriundo das escovas rotativas.

1.2. JUSTIFICATIVA

O reaproveitamento das escovas de motores elétricos justifica-se por diversos fatores econômicos, ambientais e técnicos. Pois estas feitas de materiais como grafite ou metais preciosos (como prata ou cobre). O descarte inadequado dessas escovas contribui para o acúmulo de resíduos e desperdício de recursos valiosos. Reaproveitá-las ajuda a diminuir a quantidade de lixo gerado e promove uma abordagem mais sustentável.

Além disso, o reaproveitamento reduz a necessidade de extração de novas matérias-primas, que pode ser cara e ambientalmente prejudicial. Isso é particularmente relevante em indústrias que utilizam motores em larga escala, como transporte e manufatura. Pois, ao se reaproveitar escovas pode ser mais econômico do que fabricar ou adquirir novas, especialmente em motores industriais que utilizam peças específicas e de alto custo. Sendo assim, este trabalho se justifica ao observar que mensalmente milhares de escovas rotativas podem estar sendo descartadas sem um devido reaproveitamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

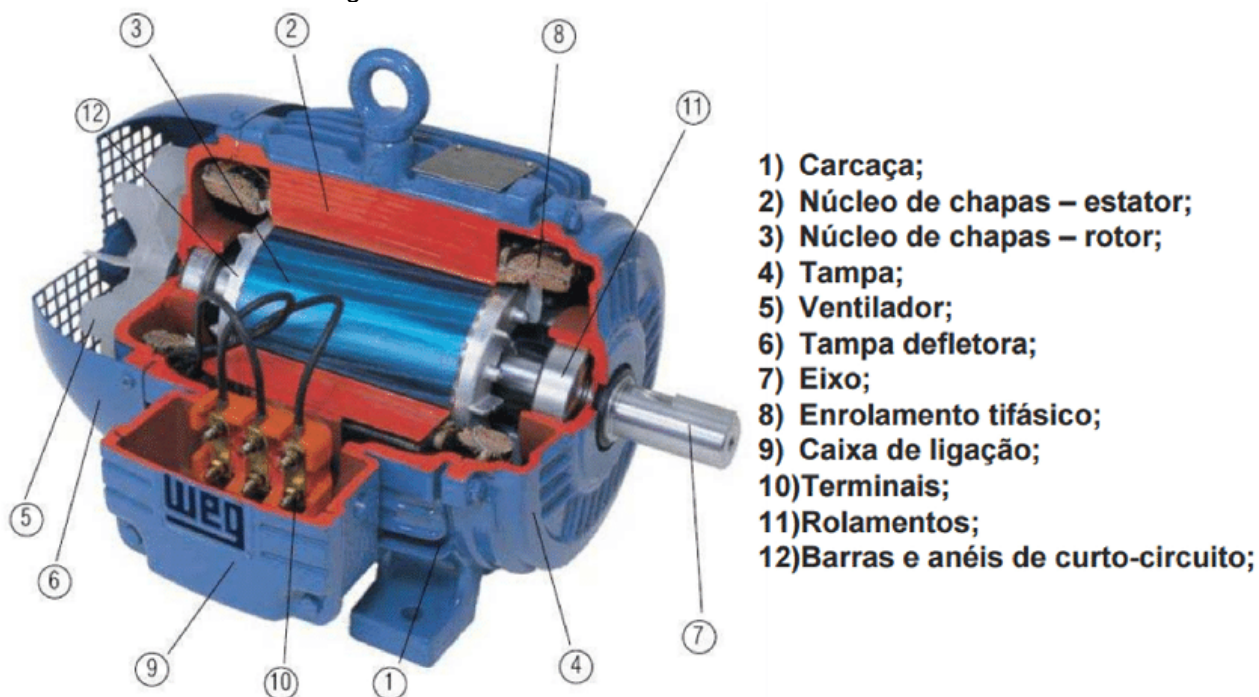
No presente capítulo serão tratados os principais assuntos que envolvem o conhecimento necessário ao desenvolvimento deste trabalho. Sólidos porosos tais como o carvão ativado, estruturas orgânicas de metal (MOFs), zeólitas, redes de polímeros orgânicos porosos, etc. oferecem uma ampla variedade de composição química e arquiteturas estruturais que são adequadas para adsorção e armazenamento de diferentes moléculas de gases incluindo o hidrogênio, metano e dióxido de carbono. Além disso, esses materiais são muito promissores em outras aplicações importantes e relevantes, incluindo armazenamento de energia eletroquímica (baterias, supercapacitores, etc.), catálise e separação (GANESAN, 2016)

Segundo Chhaliyil (2021), o carvão ativado possui diversas propriedades no que se refere a adsorção de componentes químicos indesejados a vários processos. Dentre os diversos componentes que são adsorvidos pelo carvão ativado nesses processos, este estudo será direcionado à adsorção dos gases CO₂ e H₂, pelo fato de serem os mais abundantemente encontrados em meios industriais. Esse estudo apresenta o processo de preparação do carvão ativado, enfatizando os mais recentes estudos de desenvolvimento deste processo, utilizando de ativação química do carbono, verificando o melhor controle e/ou maximização da porosidade do material.

2.1. Motores Elétricos Industriais

Os motores elétricos industriais (Figura 1) são dispositivos essenciais para o funcionamento de máquinas e sistemas em diversos setores da economia. Eles convertem energia elétrica em energia mecânica, movimentando equipamentos e realizando trabalhos fundamentais para a produção e operação de processos industriais.

Figura 1: Motor elétrico industrial visto em corte



Fonte: WEG (2024)

O princípio básico de funcionamento dos motores elétricos industriais está na interação entre campos magnéticos. Quando uma corrente elétrica passa por um enrolamento de fios condutores no interior do motor, ela cria um campo magnético que interage com o campo gerado por ímãs ou bobinas estacionárias. Essa interação gera força de torque, que faz com que o rotor do motor gire, produzindo movimento mecânico.

Os motores elétricos podem ser classificados de acordo com o tipo de corrente que utilizam (corrente alternada ou contínua) e com sua construção interna. Entre os tipos mais comuns estão:

- ✓ Motores de Corrente Alternada (CA): Incluem motores síncronos e assíncronos (ou de indução). São amplamente utilizados por sua eficiência e durabilidade.
- ✓ Motores de Corrente Contínua (CC): Conhecidos por seu controle preciso de velocidade e torque, sendo usados em aplicações específicas que requerem alta precisão.

Motores elétricos industriais são encontrados em praticamente todos os setores industriais devido à sua versatilidade e confiabilidade. Alguns exemplos de aplicações incluem:

- ✓ Indústria de Manufatura: Alimentam máquinas de produção, como prensas, esteiras transportadoras, fresadoras e tornos.
- ✓ Indústria de Processos: Utilizados em bombas, compressores e misturadores para a manipulação de líquidos, gases e sólidos.
- ✓ Automação e Robótica: Movimentam braços robóticos e sistemas automatizados para montagem e inspeção de peças.
- ✓ Sistemas de Climatização: Acionam ventiladores, compressores e exaustores em sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (HVAC).
- ✓ Mineração e Construção: Operam equipamentos pesados, como guinchos, elevadores e britadores.
- ✓ Energia e Meio Ambiente: Usados em turbinas eólicas e sistemas de bombeamento em projetos de irrigação ou saneamento.

Os motores elétricos industriais se destacam por sua eficiência energética, longa vida útil, baixo custo de manutenção e alta confiabilidade. Além disso, com o avanço da tecnologia, motores modernos contam com controle eletrônico avançado, permitindo maior eficiência e adaptabilidade em diferentes condições operacionais.

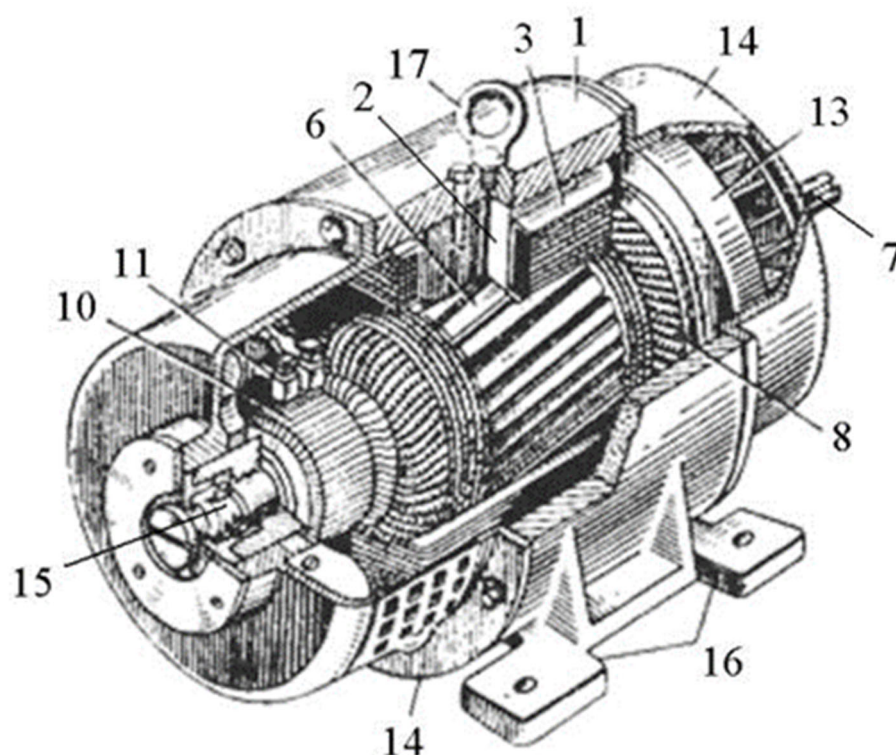
2.1.1. Motores elétricos de corrente contínua

Os motores elétricos de corrente contínua, como todas as máquinas elétricas, são invertidas, ou seja, pode operar nos modos gerador e motor. O gerador é uma fonte de eletricidade na qual a energia mecânica é convertida em energia elétrica, e no motor, ao contrário, a energia elétrica é convertida em energia mecânica.

Conforme a fabricante WEG (2024), e representado na Figura 2, a seguir, um motor de corrente contínua (motor DC) consiste em três partes principais: um estator estacionário, um rotor giratório (armadura) e um conjunto comutador. O estator inclui

uma estrutura 1, que é uma estrutura oca cilindro de aço, 2 postes principais, que são fixados à estrutura (sempre laminado) com peças polares. O enrolamento de excitação 3 é instalado nos pólos principais. Pólos adicionais 4 com enrolamento 5 colocados estão entre os pólos principais.

Figura 2: Partes de um motor elétrico de corrente contínua



Fonte: WEG (2024)

O núcleo da armadura laminada 6 é montado no eixo 7. O enrolamento da armadura 8 é colocado nas ranhuras do núcleo, nas quais são feitos canais para resfriamento 9. A unidade coletora consiste em um coletor 10, feito de placas coletoras de cobre separadas. As escovas 11 (carbono-grafite) são instaladas no comutador, as quais são conectadas à travessa 12 por meio de um porta-escovas. As escovas deslizam ao longo do comutador, proporcionando a conexão elétrica. Além disso, o motor possui ventilador 13 montado no eixo, protetores de rolamento 14, que são montados nos rolamentos 15. O motor é fixado à base por meio de patas 16.

2.2. ESCOVAS ROTATIVAS

Os motores elétricos utilizam as escovas rotativas para condução da eletricidade que passa das bobinas (também chamados de estatores – a parte fixa dos motores) para os rotores (também chamados de induzidos – a parte móvel dos motores).

A quantidade de escovas rotativas utilizadas em motores são definidas quando do projeto do motor, dependendo de sua utilização, quantidade de pólos, etc. As escovas quando instaladas ou substituídas nos motores elétricos são feitas normalmente em pares, para equalizar a carga nos rotores, evitando desgastes indevidos e substituição prematura dos rotores.

As escovas rotativas são feitas de grafite (pó de carbono) juntamente com material que garanta dureza da mesma, evitando que estas se desgastem muito rápido e também melhorando a transferência da eletricidade dos estatores para os rotores. O material mais utilizado para esse fim é o cobre, visto que ele é o melhor condutor elétrico conhecido com melhor custo benefício.

O tamanho e percentuais de misturas entre o grafite e o cobre nas escovas são definidos de acordo com a necessidade de utilização das mesmas. Segundo Borges (2007), as classes de escovas podem ser divididas em:

- ✓ Escovas de Grafite Natural
- ✓ Escovas de Carbono Duro
- ✓ Escovas Eletrográficas
- ✓ Escovas de Metal-Grafite
- ✓ Escovas de Metal-Carbono
- ✓ Escovas com Tratamento Especial para Operações Particulares

Dentre as fabricantes de escova rotativa eletrográfica, destaca-se a empresa MERSEN (2024), o modelo EG300T de escova tipo eletrográfica é composto de pó de carbono e coque e não possui metal em sua formação (Figura 3).

Figura 3: Escova MERSEN modelo EG300T



Fonte: MERSEN (2024)

Ainda de acordo com Borges (2007), as escovas eletrográficas são compostas de carbono, quando submetido à temperaturas superiores a 2.500°C, se transforma em grafite. O cristal obtido se difere do grafite natural, quando mantém a propriedade de robustez do carbono e recebe propriedades lubrificantes do grafite. O grafite assim produzido é conhecido como Eletrografite.

Em geral, após o término de sua vida útil, essas escovas são descartadas como sucata, não tendo nenhum reaproveitamento dentro da empresa que a utilizou previamente. No entanto, o material descartado, pelo fato de conter materiais nobres em sua composição, pode ser convertido em nova matéria prima e reutilizado na mesma empresa que o descarta, gerando então uma diminuição de custos e geração de nova tecnologia para o tratamento de descarte de gases e efluentes dentro desta mesma empresa. O que anteriormente era descartado como sucata se transforma em matéria prima de alto valor agregado (SOUZA, 2019).

2.3. CARVÃO ATIVADO

O carvão ativado tem origem histórica em civilizações antigas, como egípcios e gregos, sendo utilizado para combater intoxicações. É produzido a partir de materiais carbonáceos, como madeira, cascas e resíduos vegetais, aquecidos em temperaturas entre 800 e 1.000°C sob baixo oxigênio, garantindo alta porosidade. Sua estrutura altamente porosa o torna eficaz na adsorção de gases, líquidos e impurezas, promovendo clarificação, desodorização e purificação (CHHALIYIL, 2021).

Segundo Schettino (2007), é um material poroso amplamente utilizado devido à sua alta capacidade de adsorção, ou seja, a habilidade de capturar moléculas ou partículas na superfície de seus poros. Ele é produzido a partir de matérias-primas como madeira, carvão mineral, casca de coco ou outros materiais carbonáceos, submetidos a processos de carbonização e ativação para aumentar sua porosidade e área superficial.

Segundo Febriani, et al (2019), entre as suas principais propriedades, destacam-se:

- ✓ Alta adsorção: Capaz de reter moléculas de substâncias em sua rede de poros.
- ✓ Versatilidade: Adequado para aplicações em diferentes estados físicos de contaminantes.
- ✓ Eficácia terapêutica: Usado para reduzir a absorção de toxinas pelo trato digestivo em casos de intoxicação.

Tendo como principais aplicações, entre outras: tratamento de água para remoção de impurezas, contaminantes químicos e metais pesados; purificação de gases e líquidos em indústrias químicas e farmacêuticas; redução de materiais radioativos, como iodo, em sistemas de água, exemplificado por práticas no Japão; utilizado no tratamento de intoxicações por adsorção de substâncias tóxicas no trato gastrointestinal; aplicado em casos de superdosagem de fármacos, incluindo antidepressivos tricíclicos, barbitúricos e opióides; eficiente na interrupção da circulação entero-hepática de drogas, aumentando a eliminação de substâncias tóxicas; remoção de cobre em cachaças artesanais, promovendo a segurança e a

qualidade do produto; desodorização e descoloração de alimentos e bebidas (FREITAS, 2020).

Mais recentemente o carvão ativado foi testado para adsorver vitamina C de comprimidos efervescentes. O método utilizado incluiu iodometria para medir a concentração de vitamina C antes e depois do tratamento com carvão ativado. Os resultados mostraram que o material adsorveu completamente a vitamina C, validando sua capacidade de retenção (PALANDI, 2020).

De acordo com Oliveira (2019), sua utilização demonstra ser eficaz no controle de contaminantes e toxinas, sendo seguro para uso em diversas condições, com poucos efeitos colaterais. Também reduz impactos ambientais em processos industriais e tratamento de resíduos. Porém, ressalta-se que não adsorve substâncias como álcoois, metais e derivados de petróleo e não é eficaz em venenos altamente ácidos ou básicos e requer orientação médica para uso seguro. Mais recentemente, o uso de carvão ativado tem aumentado devido à necessidade de soluções sustentáveis para problemas ambientais e médicos.

O carvão ativado vem sendo amplamente estudado devido à suas diversas propostas de utilização. Entre elas, a capacidade de adsorção de gases em meios industriais, tais como em siderúrgicas, petroquímicas, metalúrgicas, incineradores de lixo, etc. (GUAMAN, 2021).

Ainda, de acordo com Alonso, et. al. (2017), o carvão ativado possui diversas vantagens sobre outros adsorventes, dentre elas estão a sua excelente estabilidade de regeneração, baixo custo e ampla variedade de fontes disponíveis e processos de ativação para sua produção.

Na indústria, os carvões ativados despertam um interesse significativo, sendo amplamente usado para tratamentos de águas residenciais e de efluentes industriais, podendo servir de catalisadores e suporte de catalisadores. Assim como, também, são aplicados em diversos casos, em tratamento de poluentes atmosféricos e adsorção de compostos orgânicos. Possuem capacidade de remoção de pesticidas e compostos orgânicos dissolvidos, e metais pesados. (LEGROURI, et al., 2005)

Porém este pode ser fabricado em várias formas, como pó, grânulos ou pellets, dependendo da aplicação. O carvão ativado é uma ferramenta essencial em

processos ambientais, industriais e medicinais, graças à sua capacidade de purificar, separar e proteger contra contaminantes (MORAES, 2022)

2.3.1. PREPARAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO

Segundo Deng et. al. (2014) O carvão ativado é muito competitivo em relação aos outros adsorventes devido à sua larga área de superfície, estrutura de poros ajustável e relativo baixo custo de preparação.

Segundo Moura (2022), o carvão ativado é produzido inicialmente pela carbonização. Onde a matéria-prima é aquecida em alta temperatura (sem a presença de oxigênio) para remover componentes voláteis. Porém sua efetiva ativação ocorre quando o material carbonizado é tratado com agentes químicos (como ácido fosfórico ou cloreto de zinco) ou com vapor de água em alta temperatura, criando uma estrutura altamente porosa. Garantindo alta área superficial, que pode chegar a centenas ou até milhares de metros quadrados por grama, associada a sua porosidade, composta por micro, meso e macroporos que permitem a adsorção de diferentes tipos de moléculas.

Conforme Schneider (2008), para a obtenção do carvão ativado utiliza-se de duas etapas básicas: a carbonização da matéria precursora através de pirólise e a ativação do carvão através de processo químico ou físico. A etapa de carbonização consiste na pirólise (tratamento térmico) do material precursor em uma atmosfera inerte em temperatura superior a 473K (200oC).

Esta etapa serve como preparação do material precursor, de onde será retirado componentes voláteis e gases leves (como CO, H₂, CO₂ e CH₄), gerando uma massa de carbono fixo e uma estrutura porosa primária que favorecerá a posterior ativação. Os parâmetros que certificarão a qualidade e o rendimento do carbono são a taxa de aquecimento, temperatura final, fluxo de gás de arraste e natureza da matéria precursora (CLAUDINO, 2003)

Ainda, de acordo com Claudino (2003), após o tratamento térmico (pirólise), será realizada a ativação do carbono. O objetivo principal desta etapa é aumentar a área superficial do carbono, submetendo-o a reações secundárias. Desta etapa

busca-se o controle de características básicas do material, tais como: Distribuição de poros, área superficial específica, atividade química da superfície, resistência mecânica, etc., conforme a configuração requerida para uma aplicação específica. Existem dois modos de ativação: Ativação química ou física.

As principais propriedades do carvão ativado são (i) área de superfície, (ii) volume do poro, (iii) tamanho do poro e (iv) distribuição de tamanho dos poros (SUN, *et. al.*, 2016), como a seguir:

- ✓ A área de superfície é medida em $m^2.g^{-1}$.
- ✓ O volume do poro é medido em $cm^3.g^{-1}$.
- ✓ O tamanho do poro é medido em nm.

De acordo com Rouquerol *et al.* (2012), a classificação de tamanho dos poros é feita pela IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), que os classificam como microporos (diâmetro $< 2nm$), mesoporos (diâmetro na faixa de 2-50nm) e macroporos (diâmetro $> 50nm$), conforme tabela 1.

Tabela 1: Classificação de Poros (IUPAC).

Tipo de poro	Diâmetro médio	Função Principal
Microporos	$\theta m < 2 \text{ nm}$	Contribuem para a maioria da área superficial que proporciona alta capacidade de adsorção para moléculas de dimensões pequenas.
Mesoporos	$2 \text{ nm} < \theta m < 50nm$	Essenciais para adsorver moléculas grandes, como corantes, e contribuem para a área superficial de carvões impregnados com produtos químicos.
Macroporos	$\theta m > 50 \text{ nm}$	Considerados sem importância para a adsorção e sua função é servir como meio de transporte de as moléculas gasosas

Fonte: Rouquerol *et al.* (2012)

Segundo Dubinin et al. (1979), as 3 classificações de poros, incluindo o diâmetro médio, volume de poros e área de superfície de um material adsorvente, são demonstradas na tabela 2, a seguir.

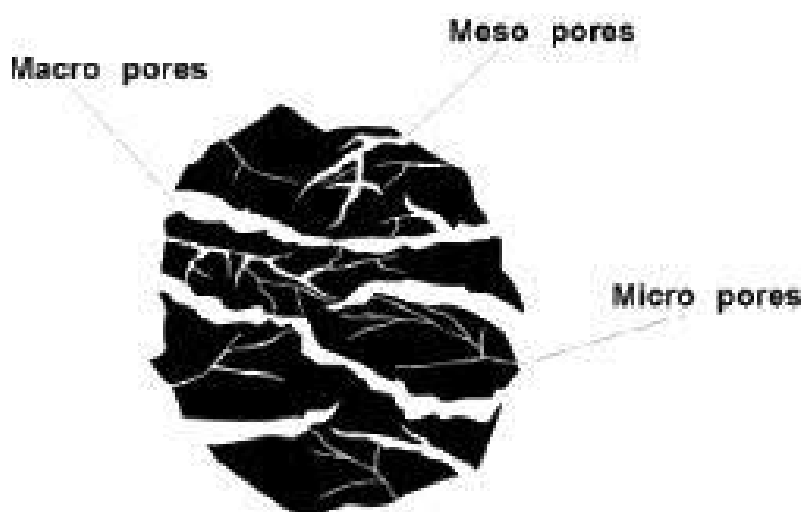
Tabela 2: Classificação dos poros de um adsorvente.

Classificação	Diâmetro médio dos poros (nm)	Volume de poros (cm³.g⁻¹)	Área de Superfície (m².g⁻¹)
Microporos	< 2	0,2 - 0,6	400 - 900
Mesoporos	02 - 50	0,02 - 0,1	20 - 70
Macroporos	> 50	0,2 - 0,8	0,5 - 2

Fonte: Dubinin et al. (1979)

Conforme Kasperiski et. al. (2018) o carvão ativado vem sendo extensivamente utilizado como adsorvente em processos de adsorção devido a seu alto volume de poros com uma estrutura interna bem desenvolvida. Como consequência, essa característica determina uma larga superfície de área. Uma representação esquemática do carvão ativado é apresentado na figura 4.

Figura 4: Exemplo de classificação dos poros no carvão ativado



Fonte: Razi et al. (2016)

O potencial do carvão ativado na captura de CO₂ depende de alguns critérios tais como o método de ativação e a natureza do material utilizado, que por sua vez afeta a porosidade e superfície do carvão ativado sintetizado. No entanto, a exploração da utilização do carvão ativado na captura de CO₂ não tem sido extensivamente avaliado. Ele tem sido utilizado de forma piloto em usinas de energia, mas não em larga escala. Portanto, é necessário desenvolver opções de baixo custo para usinas de grande porte (OGUNGBENRO, et al, 2016).

Segundo Song et al. (2015), a adsorção de CO₂ é predominantemente dependente do volume de mesoporos quando a área de superfície BET é menor que 500 m².g⁻¹, enquanto a adsorção está intimamente associada com a área de microporos quando a área de superfície BET é maior que 500 m².g⁻¹.

2.3.2. Ativação Química

Segundo Sevilla et al. (2014), a ativação química consiste no tratamento térmico da mistura do carbono precursor juntamente com o agente de ativação a uma temperatura entre 450 a 900 graus celsius. a ativação química tem as seguintes vantagens sobre a ativação física:

- (i) normalmente envolve apenas um processo,
- (ii) temperaturas mais baixas de pirólise,
- (iii) obtenção de maior rendimento do carbono,
- (iv) obtenção de materiais com área superficial muito maior (~3600 m².g⁻¹) e
- (v) a microporosidade pode ser bem desenvolvida, controlada e adaptada para ser estreitamente distribuída.

Essas duas últimas vantagens do processo de ativação química são muito importantes para aplicações tais como acúmulo de energia em supercapacitores ou para adsorção de gases (H₂, CH₄ e CO₂), as quais demandam materiais com área superficial maiores e microporosidade ajustada para o tamanho dos íons eletrolíticos para supercapacitores ou ~0.7 a 1 nm para adsorção de gases. Ainda descreve Sevilla

et al. (2014) que, dos muitos reagentes propostos para a ativação química ($ZnCl_2$, H_3PO_4 , $AlCl_3$, $MgCl_2$, KOH , $NaOH$, etc.), $ZnCl_2$, H_3PO_4 e KOH são os mais comumente utilizados. $ZnCl_2$ e H_3PO_4 funcionam como agentes desidratantes, enquanto KOH funciona como um oxidante.

Dos reagentes descritos acima como os mais comumente utilizados para a ativação química, abordaremos a seguir cada um destes reagentes, baseados em pesquisas realizadas com os mesmos, utilizando-se materiais precursores distintos, onde podemos constatar as características físicas do carvão após sua ativação:

a) Cloreto de Zinco ($ZnCl_2$)

Segundo Kasperiski et al. (2018), o carvão ativado preparado a partir de restos de sementes de poda de Pau Ferro (*Caesalpinia Ferrea*) foi ativado quimicamente utilizando o reagente cloreto de zinco ($ZnCl_2$), para remoção de captopril de efluentes aquosos de hospitais. A mistura do precursor e do agente ativador foi pirolisado a $600^\circ C$ num forno convencional, na proporção de 1,5:1 ($ZnCl_2$:Carvão). Do carvão ativado obteve-se uma medida de área superficial de $1480 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e volume de poros de $0,572 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$.

b) Ácido Fosfórico (H_3PO_4)

Segundo Maia et al. (2018), o carvão ativado preparado a partir de sementes de pêssegos foi ativado quimicamente utilizando o reagente ácido fosfórico (H_3PO_4), para adsorção de gases N_2 e CO_2 . A mistura do precursor e do agente ativador foi pirolisado a $450^\circ C$ num forno convencional, na proporção de 1:1,4285 (H_3PO_4 :Carvão). Do carvão ativado obteve-se uma medida de área superficial de $1943 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$ e volume de poros de $0,58 \text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$.

c) Cloreto de Alumínio ($AlCl_3$)

Segundo Liang et al. (2011), o carvão ativado preparado a partir de bagaço de cana foi ativado quimicamente utilizando o reagente cloreto de alumínio ($AlCl_3$), para remoção de fósforo em soluções aquosas. A mistura do precursor e do agente ativador foi pirolisado a $900^\circ C$ num forno de mufla, na proporção de 8:1 ($AlCl_3$

{0,39%}:Carvão) . Do carvão ativado obteve-se uma medida de área superficial de 350 m².g⁻¹ . A medida de Volume de poros não foi mencionada.

d) Cloreto de Magnésio (MgCl₂)

Segundo Shashikanth et al. (2008), o carvão ativado preparado a partir de bagaçode cana foi ativado quimicamente utilizando o reagente cloreto de magnésio (MgCl₂), para adsorção de cromo (VI) de água com resíduos sintéticos. A mistura do precursor e do agente ativador foi pirolisado a 850°C num forno convencional, na proporção de 1:3 (MgCl₂:carvão). Do carvão ativado obteve-se uma medida de Área superficial de 961,55 m².g⁻¹ . A medida de volume de poros não foi mencionada.

e) Hidróxido de Potássio (KOH)

Segundo Chomiak et al. (2017), o carvão ativado preparado a partir de cascas de nozes foi ativado quimicamente utilizando o reagente hidróxido de potássio (KOH), para adsorção de gás CO₂. A mistura do precursor e do agente ativador foi pirolisado a 800°C num forno de vidro vertical, na proporção de 2:1 (KOH:carvão). Do carvão ativado obteve-se uma medida de área superficial de 2000 m².g⁻¹ e Volume de poros de 0,82 cm³.g⁻¹.

f) Hidróxido de Sódio (NaOH)

Segundo Vargas et al. (2010), o carvão ativado preparado a partir de vagens de Flamboyant (*Delonix Regia*) foi ativado quimicamente utilizando o reagente hidróxido de sódio (NaOH), para remoção de poluentes. A mistura do precursor e do agente ativador foi pirolisado a 500°C num forno convencional, na proporção de 2:1 (NaOH:Carvão). Do carvão ativado obteve-se uma medida de área superficial de 2463 m².g⁻¹ e volume de poros de 0,040 cm³.g⁻¹.

Com base nos valores apresentados acima, extraímos a tabela 3, onde os são listados os reagentes em função da área de superfície e volume de poros:

Tabela 3: Reagentes x Área de Superfície e Volume de Poros.

Reagente	Proporção (Reagente Carvão)	Temp. (oC)	Área de Superfície (m².g⁻¹)	Volume de Poros (cm³.g⁻¹)	Referência Bibliográfica
ZnCl ₂	1,5:1	600	1480	0,572	Kasperiski, et. al (2018)
H ₃ PO ₄	1:1,4285	450	1943	0,58	Maia, et. al (2018)
AlCl ₃	8:1	900	350	N.I.	Liang, et. al (2011)
MgCl ₂	1:3	850	961,55	N.I.	Shashikanth, et. al (2008)
KOH	2:1	800	2000	0,82	Chomiak, et. al (2017)
NaOH	2:1	500	2463	0,040	Vargas, et. al (2010)

Fonte: Autor (2024)

De acordo com Samanta, et al. (2012), vários sólidos porosos tais como o carvão ativado, peneiras moleculares de carbono, zeólitas e estruturas orgânicas de metal (MOFs) têm sido considerados como potenciais adsorventes para adsorção e/ou separação de CO₂.

Conforme Lillo-Rodenas et al. (2007), a ativação química com hidróxido de potássio tem sido reconhecido como um método eficiente de produção de carvão ativado microporoso para vários precursores orgânicos e carbonáceos. Em geral, à medida que se aumenta a quantidade de agentes de ativação, o desenvolvimento de porosidade (área superficial e volume dos poros) é maior, porém isso vem acompanhado por um aumento da distribuição de tamanho dos poros (PSD).

Com relação à influência da temperatura de ativação, muitos autores têm demonstrado que existe uma temperatura ótima para o desenvolvimento da porosidade, a qual depende do agente de ativação e do carbono precursor. No

entanto, a porosidade aumenta com a temperatura para um valor máximo e então começa a diminuir com o aumento dessa temperatura devido ao encolhimento ou colapso da estrutura (SRINIVAS et al, 2012)

Para a ativação química com uso de KOH o desenvolvimento máximo da porosidade é alcançado em altas temperaturas (700 – 900°C), o qual sugere que o carbono induzido à ativação pelo KOH é mais estável termicamente do que os obtidos pela ativação por ZnCl₂ ou H₃PO₄. Outros fatores que afetam o desenvolvimento de porosidade são (i) o procedimento de mistura (solução ou mistura mecânica), (ii) tempo de ativação, (iii) a taxa de vazão do gás, (iv) o tipo de gás utilizado durante o tratamento térmico e (v) a taxa de aquecimento (SEVILLA et al. 2014).

Segundo Rahman et. al. (2017), entre os métodos principais para remoção de CO₂ em misturas de gases estão os processos de absorção em aminas, adsorção em sólidos porosos, destilação criogênica e separação por membranas. As tecnologias de adsorção de pressão modulada (PSA), adsorção de vácuo modelado (VSA) e adsorção de temperatura modulada (TSA) são consideradas as soluções mais promissoras para captura de CO₂ devido ao seu baixo consumo de energia, sem produção de resíduos, simplicidade e facilidade de regeneração do adsorvente principalmente pois as forças Van der Waals fracas estão envolvidas no aprisionamento das moléculas de gás na superfície adsorvente (DUR et. al. 2016).

2.4. PROCESSO DE LIXIVIAÇÃO DO COBRE

Segundo Cunha (2003), a lixiviação é um método amplamente utilizado na extração de cobre a partir de minérios de baixo teor, sendo um processo químico que dissolve seletivamente o metal desejado para separá-lo da matriz do minério. Este método é especialmente útil em operações de mineração onde os métodos tradicionais, como a flotação ou fundição, não são economicamente viáveis devido ao baixo teor de cobre nos depósitos.

Segundo Heck et. al. (2014), no processo da lixiviação os compostos químicos são removidos através do uso de um solvente, o qual tenha afinidade com o composto químico a ser removido. O ácido sulfúrico é utilizado com minerais da classe dos

óxidos; Sal férrico oxidante é empregado no ataque a sulfetos, e as soluções amoniacais são empregadas na lixiviação de cobre nativo ou cobre e níquel no estado metálico. Se o mineral for um sulfato bastará água para dissolvê-lo.

Conforme Das (2011), existem dois métodos principais de lixiviação do cobre. Lixiviação em pilha (Heap Leaching): O minério é empilhado em camadas e irrigado com uma solução lixivante, geralmente contendo ácido sulfúrico (H_2SO_4). O ácido dissolve os óxidos de cobre presentes no minério, formando uma solução de sulfato de cobre. Lixiviação em tanque (Agitação): O minério é colocado em tanques e misturado com a solução lixivante. Esse método é mais controlado e eficiente, mas requer maiores investimentos em infraestrutura. Em seguida a solução rica em sulfato de cobre é coletada e tratada para recuperar o metal.

Segundo Song et al. (2011), os métodos mais comuns incluem para recuperação do cobre são:

- ✓ Extração por solventes (SX): Um solvente orgânico é usado para separar o cobre da solução lixivante.
- ✓ Eletrodeposição (EW): O cobre é recuperado pela passagem de uma corrente elétrica através da solução, depositando-o em placas catódicas.

Segundo Calgaro et al. (2014), utilizamos para o processo de lixiviação do cobre, um solvente conhecido como água régia que, obtem-se a partir de uma mistura de ácido nítrico (HNO_3) e ácido clorídrico (HCl), na proporção de 1:3. Onde a melhor razão sólido:líquido utilizada para a lixiviação do Cobre com água régia é a de 1g:50mL, na temperatura de 90oC e tempo de lixiviação de 1 hora, sob agitação de 600 rpm.

Conforme Moraes (2010), o material não lixiviado após a digestão, retido no papel de filtro, deve ser lavado com água deionizada e em seguida mantido em estufa a 60oC (+/- 5oC) durante 24 horas para secar. Após esse período de lixiviação, resíduo sólido não lixiviado deve ser segregado do liquor lixiviado através de filtração simples, utilizando-se papel de filtro quantitativo de porosidade 7,5 μm .

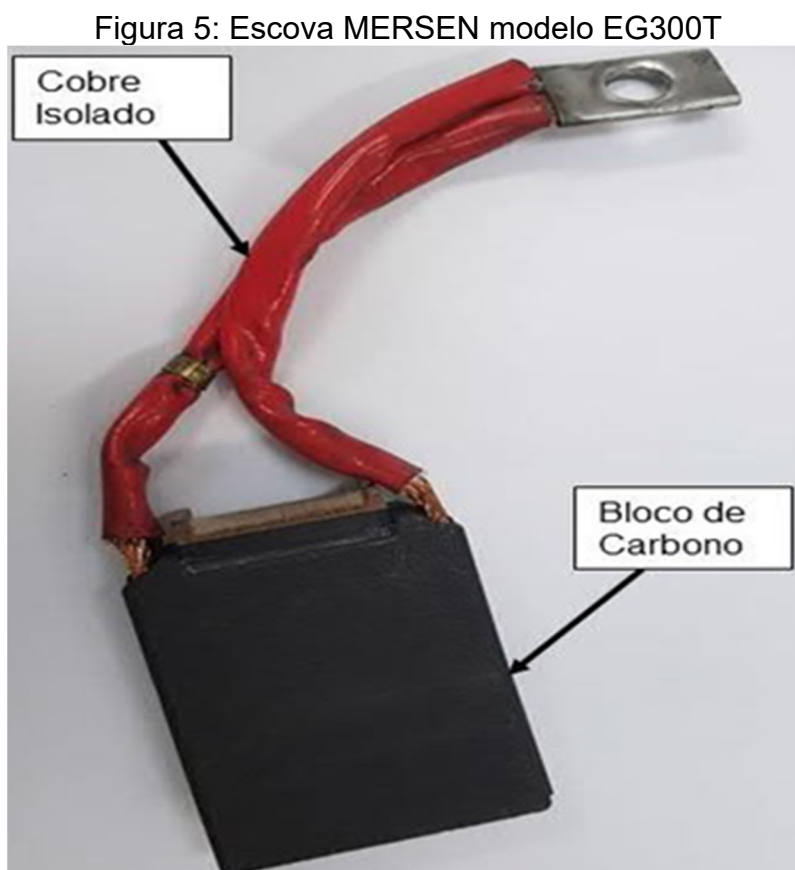
Após a extração do cobre, a solução remanescente e os resíduos sólidos são tratados para minimizar impactos ambientais. Embora menos agressivo que outros métodos, o uso de ácido sulfúrico e o manejo de resíduos requerem cuidado para evitar a contaminação do solo e da água (SINGH et al, 2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo consiste na moagem das escovas rotativas de motores elétricos após seu descarte, lixiviação do possível cobre integrante no grafite extraído, lavagem do material residual com água deionizada, ativação química do carvão e medição da capacidade de adsorção de gases H₂ e CO₂.

3.1.1. MATERIAIS

O modelo de escova rotativa utilizado nesse estudo é do fabricante MERSEN (2024), modelo EG300T e, segundo o fabricante, esse modelo de escova é do tipo Eletrográfrica e é composto de pó de carbono e coque e não possui metal em sua formação (Figura 5). Sendo estas oriundas do descarte após a sua utilização em motores elétricos de uma empresa de siderurgia localizada no sul do estado do Rio de Janeiro.

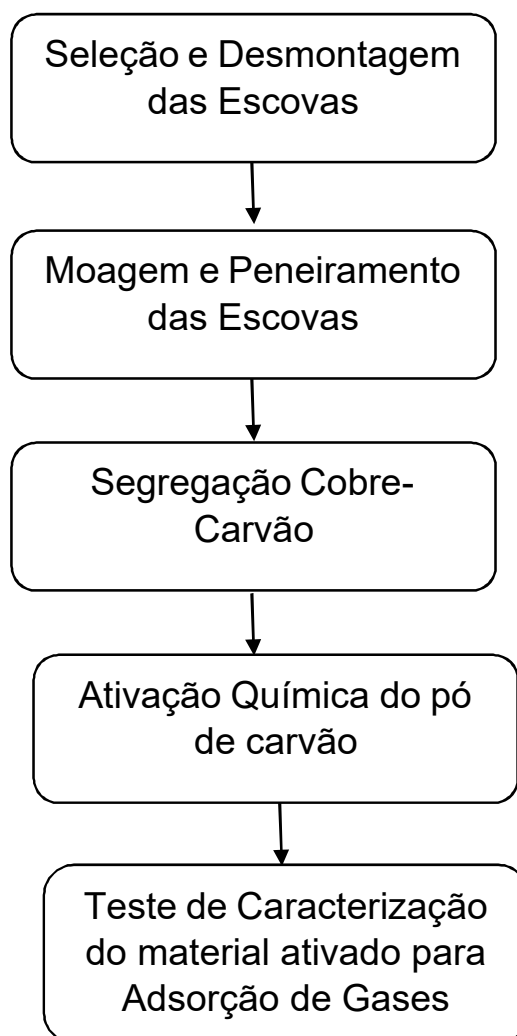


Fonte: MERSEN (2024)

3.1.2. MÉTODOS

O fluxograma (Figura 6), a seguir, reflete a metodologia desenvolvida na realização do presente trabalho.

Figura 6: Metodologia desenvolvida na realização do trabalho



Fonte: AUTOR (2024).

a) Seleção e Desmontagem das Escovas

Inicialmente, as escovas foram pesadas completas, possuindo tanto as partes metálicas (fios e terminais de fixação) quanto o carvão. O médio peso de cada escova completa (Figura 5) foi de 54,718 gramas. Após, estas foram desmontadas, retirando-

se as partes metálicas (fios e terminais de fixação) e novamente pesadas com apenas as partes de carvão. Sendo assim o peso médio final encontrado foi de 45,420 gramas.

b) Moagem e Peneiramento das Escovas

As escovas foram quebradas em pedaços menores, de forma manual, com uso de um martelo. Posteriormente, os pedaços foram cominuídos manualmente em almofariz de ágata com pistilo e peneirados em uma Peneira com largura nominal de furo de 2,5 mm. Após cominuído e peneirado o material foi novamente pesado. Seu peso foi de 34,8764 gramas. A perda de 10,5438 gramas foi devido ao material perdido na quebra inicial das escovas em pedaços menores, no material que ficou grudado no almofariz e pistilo e no material retido na peneira (Figura 7)

Figura 7: Peneira, marca VEB Metallweberei Neustadt-Orla, 2,5 mm.



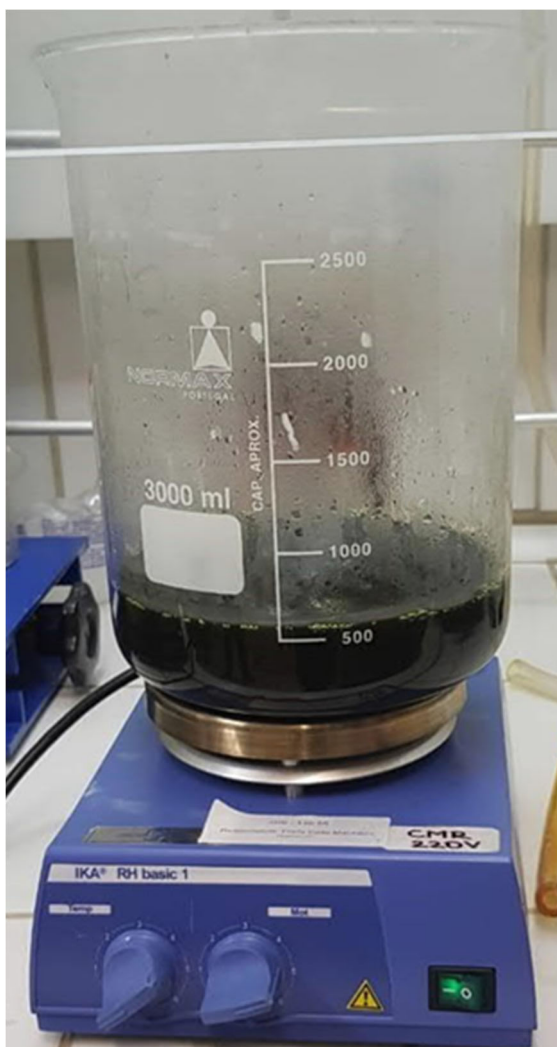
Fonte: AUTOR (2024).

c) Segregação Cobre-Carvão

Conforme a fabricante MERSEN, o modelo EG300T de escova rotativa não contém metal em sua composição. Mesmo assim, após o processo de cominuição e peneiramento das mesmas fez-se o processo de lixiviação, confirmando a não existência de cobre em sua composição.

No processo de lixiviação, o material cominuído foi peneirado (34,8764 g) e misturado a 400 ml de solução de água régia (100mL de ácido nítrico HNO_3 + 300mL de ácido clorídrico 3HCl), em (Figura 8)

Figura 8: Carbono moído misturado em água régia no agitador.



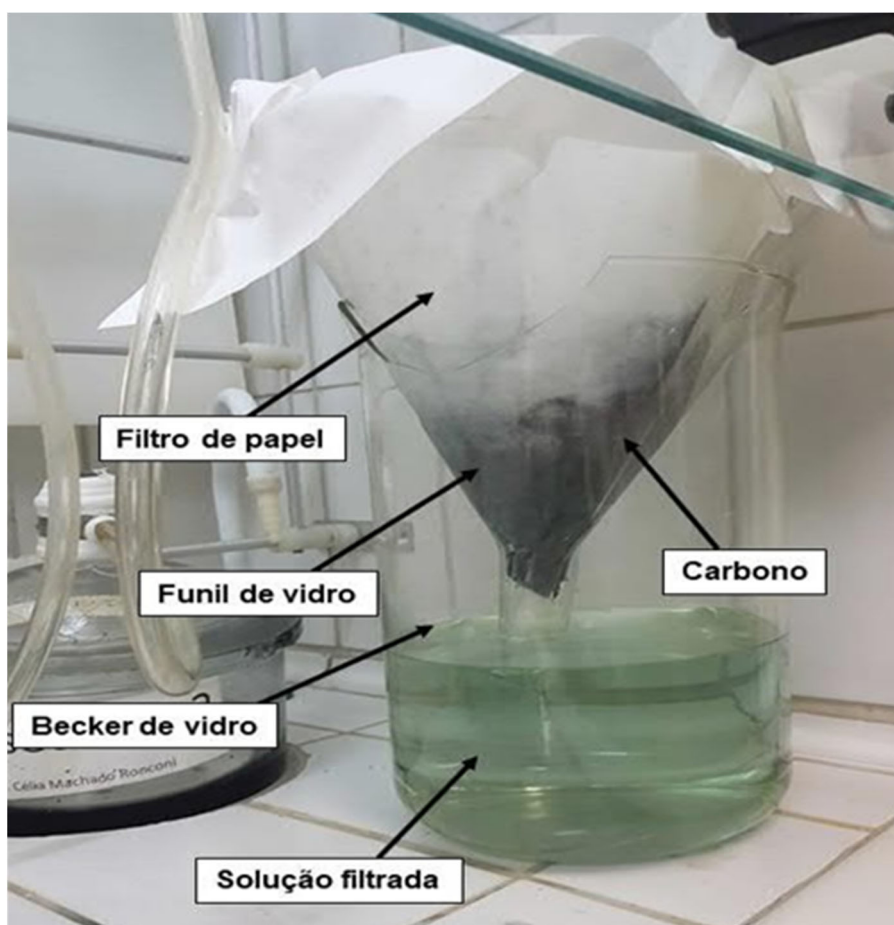
Fonte: AUTOR (2024).

Após o período de lixiviação, o resíduo sólido não lixiviado (grafite) foi separado do licor lixiviado por filtração simples, utilizando papel de filtro quantitativo com porosidade de 7,5 μm . O material retido no filtro foi lavado com água deionizada e

seco em estufa a 60oC (± 5 oC) por 24 horas. A partir de então, o material restante estará apto para a realização da ativação química.

Passado as 4h de agitação do material na água régia, foram adicionados 750 ml de água destilada ao Becker com o objetivo de diluir a solução. Deixou-se a solução descansar por 10 (dez) minutos. Logo após, foram adicionados mais 1000 ml de água destilada e agitado a 500 rpm por 05 (cinco) minutos. O material foi então filtrado e deixado secar em temperatura ambiente por 48 horas (Figura 9).

Figura 9: Filtragem do carvão após lixiviação.



Fonte: AUTOR (2024).

Após a secagem final, o material foi novamente pesado. Seu peso foi de 32,80 gramas (Figura 10).

Figura 10: Material após lixiviação pronto para ser ativado.



Fonte: AUTOR (2024).

d) Ativação química do carbono

Após a secagem final do material, foi realizado a ativação química utilizando-se como reagente o cloreto de zinco ($ZnCl_2$). Foi utilizado uma solução de $ZnCl_2$ (18,4 mol/l) na proporção mássica ($ZnCl_2$:Carvão) de 3:1. Esta mistura Reagente x Carvão ficou em repouso por 01 hora e logo depois foi seca em uma estufa a 100 oC por um periodo de 24 horas.

Posteriormente, o material foi colocado em um forno utilizando um tubo de quartzo, numa taxa de aquecimento de 5 oC.min⁻¹ durante 100 minutos, até atingir 500oC. Após atingir essa temperatura, a amostra permaneceu por mais 1h para desidratação da mistura. Após esse período, o material atingiu a temperatura de 800oC. Após este processo, o material foi deixado resfriar e posteriormente lavado com água destilada, filtrado e secado em estufa a 100oC por 24h.

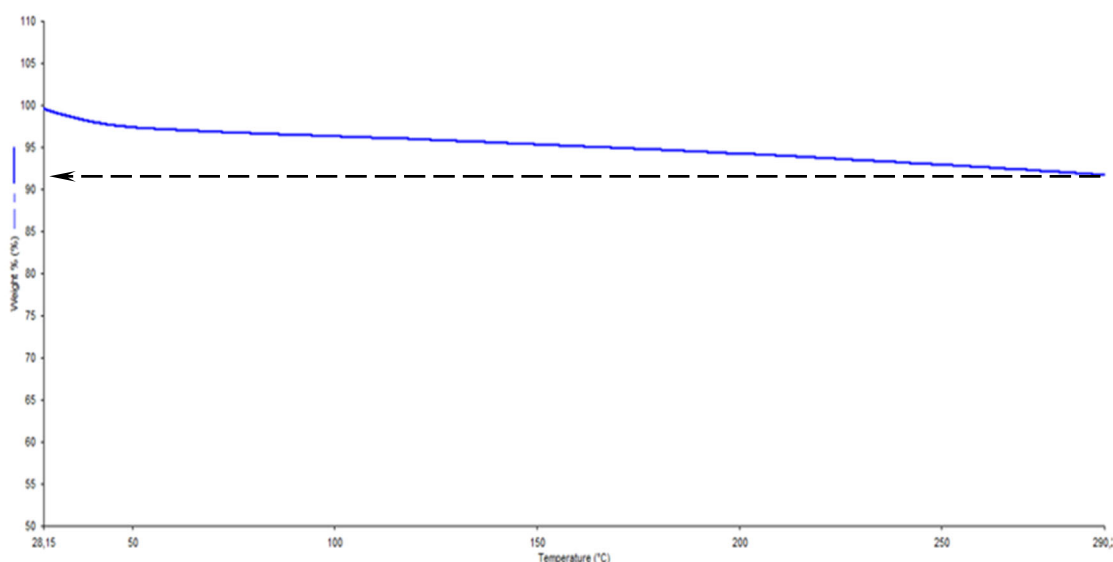
e) Teste de Caracterização do material ativado para Adsorção de Gases

Após a ativação do carvão, o mesmo foi analisado quanto à perda de massa, análise de área de superfície, volume e distribuição de poros.

f) Análise Termogravimétrica (TGA)

Após o processo de ativação química o material foi realizado uma análise térmica com o objetivo de avaliar a perda de massa do material dependente da temperatura. Os parâmetros utilizados serão 5° C/min de taxa de aquecimento, temperatura inicial de 30 oC e temperatura final de 300 oC. Ao final do ensaio foi obtido uma curva temperatura x % perda de massa (figura 11). O equipamento é da marca Perkin Elmer modelo STA 6000, montado no laboratório de caracterização de materiais do UNIFOA. É importante destacar que esta técnica experimental é destrutiva não podendo ser utilizado o material após o ensaio.

Figura 11: Curva temperatura x % de massa.



Fonte: AUTOR (2024).

g) Ensaio para medição da área superficial a partir do método BET (Brunauer, Emmet and Teller)

Após o processo de ativação, foi medido a área superficial do material a partir de isotermas do tipo Brunauer, Emmett e Teller (BET) e Lagmuir. Este equipamento permite a realização de análises de área de superfície, de volume de poros e distribuição de meso e microporos. O método de adsorção de BET é o procedimento mais utilizado para a determinação da área superficial específica total. Nesse método, o gás passa sobre uma amostra resfriada à temperatura do nitrogênio líquido (77K),

sob pressões de até 2 atm e pressões relativas (P/P_0) inferiores a 0,3. O N₂ adsorvido fisicamente em cada pressão produz uma alteração na composição de saída, registrada por um detector de condutividade térmica, ligado a um registrador potenciométrico. Ao aquecer a amostra, pela perda de contato do N₂ líquido com a célula de amostragem, o N₂ é dessorvido. A área dos picos é proporcional à massa de N₂ dessorvida. A partir do volume de N₂ obtido no ensaio e utilizando a equação de BET, determina-se o volume de nitrogênio necessário para recobrir a superfície adsorvente com uma monocamada. Este ensaio foi realizado no Instituto de Química da UERJ – Campus Maracanã.

h) Caracterização por Difração de Raios-X (DRX)

Foi realizada análise por difração de raios-X (DRX) antes e depois do processo de lixiviação do cobre com o objetivo de identificar as fases presentes antes da lixiviação e confirmar a extração do cobre após a lixiviação.

Os ensaios foram realizados em um equipamento da marca RIGAKU modelo Miniflex, utilizando radiação $\text{CuK}\alpha$ (1,540 Å), que pertence ao Laboratório de Cinética, Catálise e Reatores Químicos (RECAT) da UFF-Niterói.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos.

4.1. MOAGEM DO MATERIAL

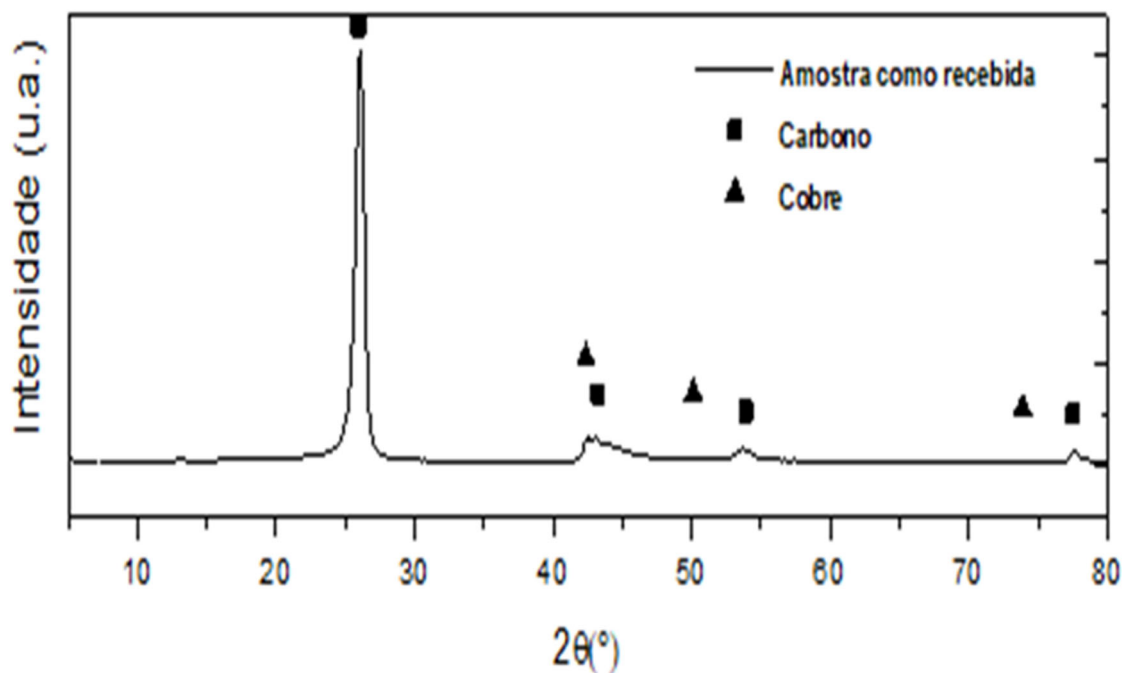
Para saber qual é a perda de material após o processo de moagem e peneiramento, foi realizado inicialmente a aferição da massa da escova rotativa como recebida. A massa do material recebido foi de 54,718 g.

Após o processo de desmontagem, moagem e peneiramento, obtivemos uma massa de 34,8764 gramas de material, o qual foi utilizado para a realização da extração do cobre. O percentual de perda de material foi de 36,26 %. Esta perda está relacionada com o material perdido na quebra inicial das escovas em pedaços menores, no material que ficou grudado no almofariz e pistilo, no material retido na peneira e também ao retirar os fios e conectores que faziam parte das escovas.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ANTES DA EXTRAÇÃO DO COBRE

O material após moído e peneirado, foi caracterizado por Difração de Raios X (DRX) com o objetivo de identificar as fases antes da lixiviação de cobre do material. A figura 12, a seguir, mostra o difratograma realizado da amostra, variando o ângulo da amostra de 5 a 80o.

Figura 12: Difratoograma de raios-X da amostra como recebida.



Fonte: AUTOR (2024).

Observa-se no difratograma que a amostra apresentou três picos (44, 50 e 74°) referentes a fase cobre, o que demonstra que a amostra recebida continha cobre. Após o processo de extração do cobre pelo método de lixiviação, nova Difração de Raios X (DRX) foi realizada para a comprovação da completa extração do cobre.

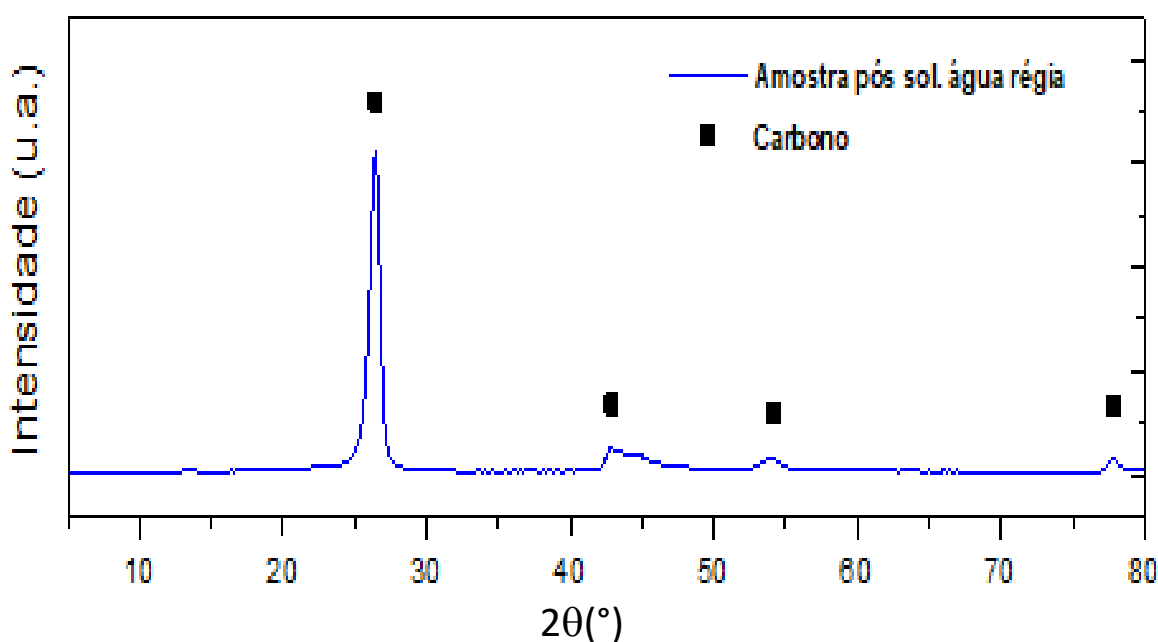
4.3. EXTRAÇÃO DO COBRE

O processo de lixiviação para extração do possível cobre consistiu na imersão do material cominuído em uma solução de água régia durante 4 horas. Após este processo a solução foi diluída, filtrada e secada a temperatura ambiente por 48h. A solução filtrada apresentou uma coloração esverdeada clara, a qual é característica do nitrato de cobre, o que indicou que estava ocorrendo a decomposição do cobre da liga. Após a secagem da amostra foi aferido a massa que foi igual a 32,8 g, o que corresponde a uma perda de massa de 5,95%. Considerando então viável este processo de extração de cobre.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL APÓS A EXTRAÇÃO DO COBRE

O material foi novamente caracterizado por Difração de Raios X (DRX) com o objetivo de identificar as fases após a lixiviação de cobre do material. A figura 13 a seguir mostra o difratograma realizado da amostra, variando o ângulo da amostra de 5 a 80°.

Figura 13: Difratograma de raios-X da amostra após lixiviação.



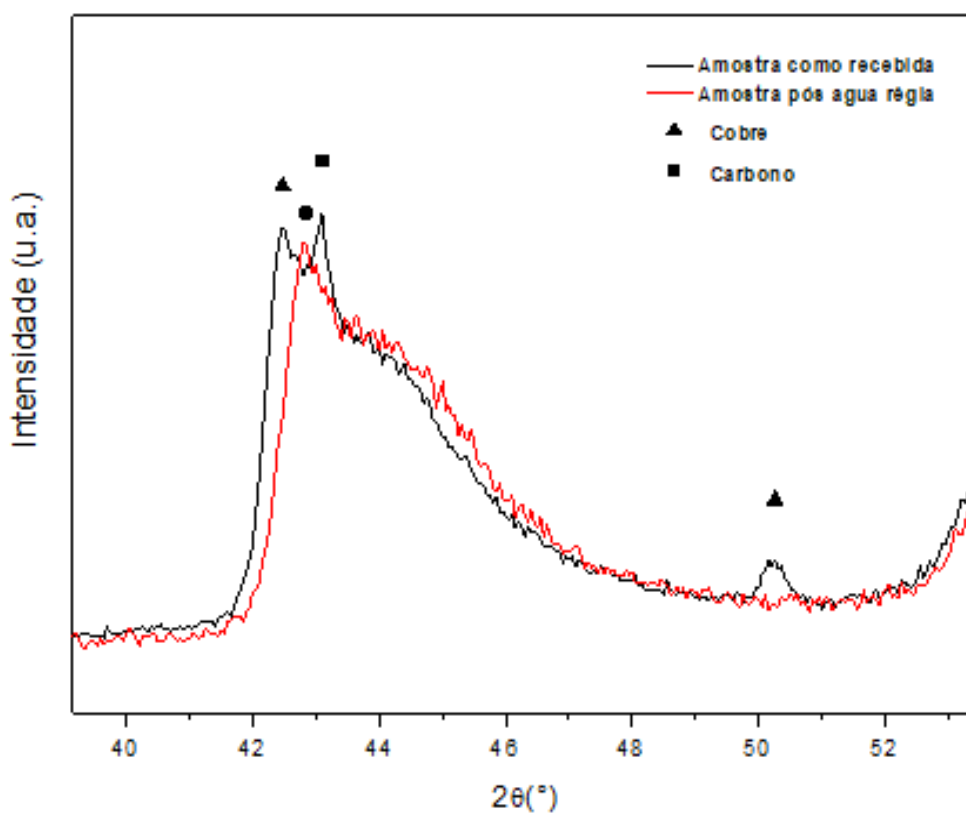
Fonte: AUTOR (2024).

No difratograma obtido, verifica-se a ausência dos picos correspondentes à fase de cobre, evidenciando que o processo de remoção de cobre foi totalmente eficiente. A amostra analisada apresentou quatro picos principais em 26°, 44°, 54° e 77°, os quais são característicos da fase C (carbono), indicando que o cobre foi completamente extraído. Esses resultados confirmam que, após o tratamento com solução de água régia, a amostra deixou de ser uma liga C-Cu, passando a ser composta predominantemente por carbono. Além disso, a formação de uma única fase residual demonstra o potencial do processo para purificação seletiva, o que pode ser relevante para aplicações futuras que exijam materiais com alta pureza de carbono.

A análise comparativa entre os dois gráficos revela diferenças significativas nas curvas apresentadas (Figura 14). A curva com picos mais altos representa a amostra como recebida, indicando uma maior presença de componentes originais, incluindo cobre, antes de qualquer tratamento. Por outro lado, a curva mais amena corresponde à amostra após o tratamento com solução de água régia, evidenciando a redução drástica ou a ausência de determinados elementos, como o cobre, devido à eficiência do processo de extração.

Essa distinção entre as curvas ilustra claramente a eficácia do método utilizado na remoção seletiva de componentes metálicos da amostra inicial. A redução nos picos também pode ser interpretada como um indicativo da mudança estrutural ou composicional da amostra, que passou a ser dominada por outros elementos ou fases, como o carbono. A comparação destaca a transformação da amostra e a relevância de técnicas baseadas em água régia para a purificação de ligas metálicas.

Figura 14: Difratograma de raios-X da amostra após lixiviação.



Fonte: AUTOR (2024).

4.5. ATIVAÇÃO DO CARBONO

Após o processo de lixiviação, foi realizada a ativação química do carbono utilizando o reagente cloreto de zinco ($ZnCl_2$), um método amplamente reconhecido por sua eficácia em aumentar a porosidade e a área superficial específica do carbono. Esse processo foi conduzido em um forno com atmosfera controlada de nitrogênio, essencial para evitar a oxidação do material durante o tratamento térmico.

A amostra foi cuidadosamente preparada e colocada em um tubo de quartzo, devido às suas propriedades de resistência a altas temperaturas e inércia química, garantindo a pureza do material durante o aquecimento. O tubo de quartzo foi acoplado ao interior de um forno de resistência, permitindo a aplicação uniforme de calor ao longo do processo de ativação.

O cloreto de zinco ($ZnCl_2$) atua como agente químico para a ativação, promovendo a formação de uma estrutura porosa ao interagir com o carbono e facilitar a remoção de voláteis durante o tratamento térmico. O ambiente com fluxo constante de nitrogênio assegura que as condições anóxicas sejam mantidas, minimizando a degradação indesejada do material.

Esse processo é uma etapa crucial para a obtenção de carbono ativado com alta qualidade, ampliando suas propriedades de adsorção, tornando-o adequado para diversas aplicações industriais e ambientais, como purificação de líquidos e gases. A tabela 4, a seguir apresenta os valores obtidos após ativação do carbono e medido a área superficial do material a partir de isotermas do tipo Brunauer, Emmett e Teller (BET) e Lagmuir.

Tabela 4: Valores obtidos do carvão ativado pelo ensaio BET.

Indicador de área	CP 01	CP 02	CP 03
Área superficial específica [m ² .g ⁻¹]	563	655	587
Cinzas [%]	0,23	0,26	2,45
Volume de microporos, cm ³ .g ⁻¹	0,19	0,22	0,21
Volume de mesoporos, cm ³ .g ⁻¹	0,18	0,23	0,05

Fonte: Autor (2024)

A análise das características das amostras CP 01, CP 02 e CP 03 revela diferenças significativas em seus indicadores de área superficial específica, teor de cinzas e volumes de microporos e mesoporos. CP 02 se destaca como a amostra com o maior potencial de desempenho, seguida por CP 01 e, por último, CP 03. Em relação à área superficial específica, CP 02 apresenta o maior valor (655 m².g⁻¹), o que a torna a mais adequada para aplicações que exigem maior potencial de adsorção, como filtração e purificação. CP 01, com 563 m².g⁻¹, tem o menor valor entre as amostras, enquanto CP 03 apresenta um desempenho intermediário (587 m².g⁻¹).

O teor de cinzas também varia entre as amostras, influenciando sua pureza. CP 01 e CP 02 possuem baixos teores (0,23% e 0,26%, respectivamente), indicando alta pureza e tornando-as mais indicadas para aplicações que exigem materiais livres de impurezas. Por outro lado, CP 03 apresenta um teor de cinzas elevado (2,45%), o que compromete sua qualidade em aplicações sensíveis e pode indicar a presença de resíduos minerais ou impurezas no material.

Em termos de porosidade, CP 02 novamente se destaca, com os maiores volumes tanto de microporos (0,22 cm³.g⁻¹) quanto de mesoporos (0,23 cm³.g⁻¹), o que amplia sua capacidade de adsorção de moléculas pequenas e maiores. CP 01 apresenta volumes ligeiramente menores de microporos (0,19 cm³.g⁻¹) e mesoporos (0,18 cm³.g⁻¹), enquanto CP 03, apesar de ter um bom volume de microporos (0,21 cm³.g⁻¹), possui o menor volume de mesoporos (0,05 cm³.g⁻¹), limitando sua eficiência em adsorver moléculas maiores. Conclui-se que CP 02 é a amostra mais versátil e eficiente, enquanto

CP 01 é uma alternativa razoável e CP 03, apesar de algumas qualidades, apresenta limitações significativas para aplicações mais exigentes.

A comparação dos dados da tabela 4 com os valores de carvão ativado da literatura observamos que o CP 02 (655 m².g⁻¹), está dentro do intervalo esperado para carvões ativados de alta qualidade (600 a 1200 m².g⁻¹). Por outro lado, CP 01 (563 m².g⁻¹) e CP 03 (587 m².g⁻¹) apresentam valores abaixo do ideal, mas ainda aceitáveis para aplicações menos exigentes.

No que se refere ao teor de cinzas, CP 01 (0,23%) e CP 02 (0,26%) demonstram alta pureza, comparável ao carvão ativado, enquanto CP 03 (2,45%) apresenta um valor mais elevado, o que pode prejudicar sua utilização em processos que requerem materiais de baixa contaminação. Quanto à porosidade, CP 02 se destaca tanto no volume de microporos (0,22 cm³.g⁻¹) quanto no de mesoporos (0,23 cm³.g⁻¹), tornando-se ideal para adsorção de moléculas pequenas e maiores. CP 01 apresenta volumes ligeiramente inferiores de microporos (0,19 cm³.g⁻¹) e mesoporos (0,18 cm³.g⁻¹), mas ainda satisfatórios. Já CP 03, embora possua um bom volume de microporos (0,21 cm³.g⁻¹), apresenta um volume muito baixo de mesoporos (0,05 cm³.g⁻¹), limitando sua eficiência em adsorção de moléculas maiores.

Sendo assim, o CP 02 possui as características mais próximas de um carvão ativado de alta qualidade, com boa área superficial, baixo teor de cinzas e volumes equilibrados de poros. CP 01 é uma alternativa viável, mas com desempenho inferior, especialmente em microporos. CP 03, apesar de algumas boas características, apresenta desvantagens significativas, como alto teor de cinzas e baixo volume de mesoporos, tornando-o menos competitivo para aplicações mais exigentes. Esses dados indicam que CP 02 é a amostra mais recomendada para aplicações que demandam propriedades semelhantes às de carvões ativados de melhor qualidade.

5. CONCLUSÕES

Após as análises podemos concluir que:

- ✓ A caracterização inicial por Difração de Raios X (DRX) confirmou a presença de cobre na amostra, com picos específicos indicando a fase metálica. Após o processo de lixiviação com solução de água régia, que apresentou uma eficiência de extração superior a 95%, foi verificada a completa remoção do cobre. A amostra passou a apresentar picos característicos da fase carbono, demonstrando a eficiência do método em transformar a liga inicial C-Cu em um material predominantemente constituído por carbono.
- ✓ O processo de ativação química utilizando cloreto de zinco ($ZnCl_2$) foi adequado. A atmosfera controlada de nitrogênio evitou oxidações indesejadas, enquanto o tratamento térmico promoveu a formação de uma estrutura porosa. A amostra CP 02 se destacou entre as analisadas, apresentando maior área superficial ($655 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$) e volumes equilibrados de micro e mesoporos, características que a tornam ideal para aplicações exigentes, como filtração e purificação.
- ✓ Em comparação, CP 01 mostrou-se uma alternativa viável, mas com desempenho inferior em relação à CP 02, especialmente no volume de microporos. Já CP 03, apesar de algumas qualidades, apresentou limitações significativas, como o elevado teor de cinzas e baixo volume de mesoporos, o que restringe seu uso em aplicações mais exigentes. Conclui-se que CP 02 possui as propriedades mais próximas de carvões ativados de alta qualidade, sendo recomendada para aplicações que demandam alta eficiência e pureza, confirmando a relevância das técnicas utilizadas neste estudo.

6. TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Avaliar o volume de escovas descartadas pela indústria brasileira anualmente;
- ✓ Avaliar o custo da logística reversa para o recolhimento das escovas descartadas anualmente pela indústria brasileira;
- ✓ Verificar a existência de outras rotas de beneficiamento e transformação da escova em carvão ativado;
- ✓ Realizar uma avaliação econômico-financeira da viabilidade da recuperação das escovas e conversão em carvão ativado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, A., Moral-Vico, J., ABO MARKEB, A., BUSQUETS-FITÉ, M., KOMILIS, D., PUNTES, V., SÁNCHEZ, A., FONT, X., **Critical review of existing nanomaterial adsorbents to capture carbon dioxide and methane**, *The Science of the Total Environment*, 2017.

BORGES, A.N., **Caracterização de escovas de grafite e avaliação do seu desempenho em função da sua microestrutura**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.

Calgaro, C.O., SILVA, M.D.C.R., Schlemmer, D.F., Maziero, E.V., Cortês, L.N., Tanabe, E.H., Bertuol, D.A., **Recuperação de cobre de placas de circuito impresso a partir de extração supercrítica e por lixiviação ácida**. 21º CBECIMAT, Cuiabá, MT, Brasil, 2014

CHHALIYIL, Pranav *et al.* Assessing nonabrasive use of charcoal and its adsorptive microbial properties as a dentifrice. **Journal of Research in Dental Sciences**, Fairfield, Iowa, USA, v. 2, n. 2, p. 67-73, 7 out. 2021.

CHOMIAK, K., GRYGLEWICZ, S., KIERZEK, K., MACHNIKOWSKI, J., **Optimizing the properties of granular walnut-shell based KOH activated carbons for carbon dioxide adsorption**. *Journal of CO2 utilization*, 2017.

CLAUDINO, A., **Preparação de Carvão Ativado a Partir de Turfa e sua utilização na remoção de Poluentes**, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

CUNHA, F. A.; MARTINS, A. H. Avaliação de alguns agentes lixiviantes para a remoção do cobre contido em um minério complexo de ouro. **Rem Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 3, p. 187–190, 2003.

DALAI, A.K., MAJUMDAR, A., CHOWDHURY, A., TOLLEFSON, E.L., **The effects of pressure and temperature on the catalytic oxidation of hydrogen sulfide in natural gas and regeneration of the catalyst to recover the sulfur produced**, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1993.

DAS, G.; LANGE, J. Reductive atmospheric acid leaching of west australian smectitic nickel laterite in the presence of sulphur dioxide and copper (II). **Hydrometallurgy**, v. 105, n. 3–4, p. 264–269, 2011.

DENG, S., WEI, H., CHEN, T., WANG, B., HUANG, J., YU, G., **Superior CO₂ adsorption on pine nut shell-derived activated carbons and the effective micropores at different temperatures**, Chemical Engineering Journal, 2014.

DUBININ, M.M., **Absorption equations for active carbons with inhomogeneous microporous structures**, The Journal Carbon, v.17, p. 505-506, 1979.

DUR, G., BUDARIN, V.L., CASTRO-OSMA, J.A., SHUTTLEWORTH, P.S., QUEK, S.C.Z., CLARK, J.H., NORTH, M., **Importance of micropore-Mesopore interfaces in carbon dioxide capture by carbon-Based materials**. Angew. Chem. Int. Ed. 55, 2016.

FEBRIANI, Mirna; JAYA, Ferry; TYAS, Harwidatih Ayuning; SASMITA, Inne S. Application of active charcoal as an ingredient of a natural bleaching teeth. **Journal of international dental and medical research**, [S. l.], ano 2019, v. 12, n. 4, p. 1310-1321, 19 maio 2019.

FREITAS, Leizer Cordeiro da Silva *et al.* **Carvão ativo: breve histórico e estudo de sua eficiência na retenção de fármacos**. Orientador: Silvia Messias Bueno. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química) - Departamento de química, Universidade Federal do Goiás, [S. l.]. 2020.

GONÇALVES TAYNARA, M.; BARROSO ANA FLAVIA, DA F. **A economia circular como alternativa à economia linear**. Disponível em: <<https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/12561/2/EconomiaCircularAlternativa.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2024.

GUAMAN, P., ANDRÉS, M., VERGARA, A., & NORKA, M.. **Revisión sistemática de la eficacia de las pastas dentales a base de carbón activado vs pastas dentales tradicionales**. Universidade Católica de Santiago de Guayaquil, 2021.

HECK, N. C. **Metalurgia Extrativa dos Metais Não-Ferrosos I-A, UFRGS / DEMET**. Porto Alegre, RS, Brasil: 2014.

KASPERISKI F.M., LIMA E.C., UMPIERRES C.S., DOS REIS G.S., THUE P.S., LIMA D.R., DIAS S.L.P., SAUCIER C., DA COSTA J.B., **Production of porous activated carbons from Caesalpinia ferrea seed pod wastes: Highly efficient removal of captopril from aqueous solutions**, Journal of Cleaner Production, 2018.

LEGROURI, K., KHOUYA, E., EZZINE, M., HANNACHE, H., DENOYEL, R., PALLIER, R., NASLAIN, R., **Production of activated carbon from a new precursormolasses by activation with sulphuric acid**, Journal of Harzardous Materials, 2005.

LIANG, M., ZENG, H., ZHU, Y., XU, Z., LIU, H., **Adsorption removal of phosphorus from aqueous solution by the activated carbon prepared from sugarcane bagasse**. Advanced Materials Research, 2011.

LILLO-RODENAS, M.A., MARCO-LOZAR, J.P., CAZORLA-AMOROS, D., LINARES-SOLANO, A., **Activated carbons prepared by pyrolysis of mixtures of carbon precursor / alkaline hydroxide**. J. Anal. Appl. Pyrol. 80, 2007.

MAIA, D.A.S., OLIVEIRA, J.C.A., NAZZARRO, M.S., SAPAG, K.M., LOPEZ, R.H., LUCENA, S.M., AZEVEDO, D.C.S., **CO₂ gas-adsorption calorimetry applied to the study of chemically activated carbons**. Chemical Engineering Research and Design, 2018.

MERSEN <<https://www.mersen.com.br/pt-br>> Acesso em 10 abr. de 2024.

MORAES, A. J. C. T. et al. Consequências e perigos do uso do carvão ativado em clareamento dental / Consequences and dangers of using activated charcoal in tooth whitenin. **Brazilian Journal of Health Review**, v. 5, n. 4, p. 12528–12536, 2022.

Moraes, V.T., **Recuperação de Metais a partir do processamento mecânico e hidrometalurgico de placas de circuito impressos de celulares obsoletos**. São Paulo, SP, Brasil, 2010

MOURA, J. A. DE; SILVA, W. M. DE A.; FRANÇA, T. DE. Perigos do uso de carvão ativado para o clareamento dental. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e9111830558, 2022.

OGUNGBENRO A.E., QUANG D.V., AL-ALI K., ABU-ZAHRA M.R.M., **Activated carbon from date seeds for CO₂ capture applications**, Department of Chemical and Environmental Engineering, Masdar Institute of Science and Technology, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2016.

OLIVEIRA, A. C. V.; SILVA, A. DE S.; MOREIRA, Í. T. A. ECONOMIA CIRCULAR: CONCEITOS E CONTRIBUIÇÕES NA GESTÃO DE RESÍDUOS URBANOS. **RDE - Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 3, n. 44, p. 273–289, 2019.

OLIVEIRA, Catarina de Jesus *et al.* **Efeitos de pastas dentífricas com carvão ativado na cor e microdureza do esmalte dentário.** Orientador: Professora Doutora Ana Filipa Marques Chasqueira. 2019. 40 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Medicina Dentária) - Faculdade de Medicina Dentária, Universidade de Lisboa, [S. /], 2019.

PALANDI, Samuel da Silva *et al.* **Effects of activated charcoal powder combined with toothpastes on enamel color change and surface properties.** Wiley, [s. /], p. 1-8, 9 ago. 2020. DOI <https://doi.org/10.1111/jerd.12646>

RAHMAN, F.A., AZIZ, M.M.A., SAIDUR, R., BAKAR, W.A.W.A., HAININ, M.R., PUTRAJAYA, R., HASSAN, N.A., **Pollution to solution: capture and sequestration of carbon dioxide (CO₂) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future.** *Renew. Sust. Energ. Rev.* 71, 2017.

RAZI, M.A.M., SURAYA, W.M.S.W., RAFIDAH, H., AMIRZA, A.R.M., ATTAHIRAH, M.H.M.N., HANI, M.S.N.Q., ADNAN, M.S., **Effect of Phosphoric Acid Concentration on the Characteristics of Sugarcane Bagasse Activated Carbon.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016

ROUQUEROL, J., BARON, G., DENOYEL, R., GIESCHE, H., GROEN, J., KLOBES, P., LEVITZ, P., NEIMARK, A.V., RIGBY, S., SKUDAS, R., SING, K., THOMMES, M., UNGER, K., **Liquid intrusion and alternative methods for the characterization of macroporous materials (IUPAC Technical Report)**, *Pure Appl. Chem.*, Vol. 84, No. 1, pp. 107–136, 2012.

SAMANTA, A., ZHAO, A., SHIMIZU, G.K.H., SARKAR, P., GUPTA, R., Post-combustion CO₂ capture using solid sorbents: a review. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51, 2012.

SCHETTINO, M. A., Jr *et al.* Preparação e caracterização de carvão ativado quimicamente a partir da casca de arroz. **Química nova**, v. 30, n. 7, p. 1663–1668, 2007.

SCHNEIDER, E.L., **Adsorção de Compostos Fenólicos sobre Carvão Ativado**, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2008.

SEVILLA, M., MOKAYA, R., **Energy Storage applications of activated carbons: Supercapacitors and hydrogen storage.** *Energy Environ. Sci.* 2014, 7, 1250.

SHASHIKANTH, R.M., SHANTHA, G.M., **Adsorption studies of chromium (VI) from synthetic aqueous solution by activated carbon derived from Bagasse**. Journal of Environmental Science and Health, 2008

SILVA, T. G. E. et al. Economia circular: Um panorama do estado da arte das políticas públicas no Brasil. **Revista produção online**, v. 21, n. 3, p. 951–972, 2021.

SINGH, J.; BHUNIA, H.; BASU, S. Synthesis of porous carbon monolith adsorbents for carbon dioxide capture: Breakthrough adsorption study. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 89, p. 140–150, 2018.

SONG, T. et al. Effect of micropore and mesopore structure on CO₂ adsorption by activated carbons from biomass. **New carbon materials**, v. 30, n. 2, p. 156–166, 2015.

SOUSA, André Santos Caires. **Análise de degradação de escovas do motor síncrono**. 2019. 55. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

GANESAN A., SHAIJUMON M.M., **Activated graphene-derived porous carbon with exceptional gas adsorption properties**, School of Physics, Indian Institute of Science Education and Research Thiruvananthapuram, Kerala, India, 2016.

SRINIVAS, G., BURRESS, J., YILDIRIM, T., **Graphene oxide derived carbons (GODCs): synthesis and gas adsorption properties**. *Energy Environ. Sci*, 2012, 5, 6453.

SUN, W., LIPKA, S.M., SWARTZ, C., WILLIAMS, D., YANG, F., **Hemp-derived activated carbons for supercapacitors**, *Carbon* N.Y. 103, 2016, 181-192.

VARGAS, A.M.M., CAZETTA, A.L., GARCIA, C.A., MORAES, J.C.G., NOGAMI, E.M., LENZI, E., COSTA, W.F., ALMEIDA, V.C., **Preparation and characterization of activated carbon from a new raw lignocellulosic material: Flamboyant (Delonix regia) pods**. *Journal of Environmental Management*, 2010.

Weg <<https://www.weg.net/catalog/notfound>> Acesso em 20 jun. de 2024.