

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LUANA MARIA MOREIRA GODOY BUENO

**CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUO TÊXTIL: SÍNTESE,
CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE CORANTE REATIVO E
DISPERSO EM EFLUENTE TÊXTIL**

APUCARANA

2023

LUANA MARIA MOREIRA GODOY BUENO

**CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUO TÊXTIL: SÍNTESE,
CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA REMOÇÃO DE CORANTE REATIVO E
DISPERSO EM EFLUENTE TÊXTIL**

**ACTIVATED CARBON FROM TEXTILE WASTE: SYNTHESIS,
CHARACTERIZATION AND APPLICATION IN THE REMOVAL OF REACTIVE
AND DISPERSE DYE IN TEXTILE EFFLUENT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Engenharia Ambiental

Linha de Pesquisa: Tecnologias Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Maestá Bezerra

Coorientadora: Prof(a). Dr(a). Taís Larissa da Silva

APUCARANA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



LUANA MARIA MOREIRA GODOY BUENO

**CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUO TÊXTIL: SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO NA
REMOÇÃO DE CORANTE REATIVO E DISPERSO EM EFLUENTE TÊXTIL**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 21 de Setembro de 2023

Fabricao Maesta Bezerra, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dayane Samara De Carvalho Coltre, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Kesia Karina Oliveira Souto Silva, Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (Ufrn)

Dra. Rubiane Ganascim Marques, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 21/09/2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, sem ele nada disso seria possível.

Agradeço ao meu marido, por todo apoio desde sempre.

Agradeço à minha família pelo apoio e ajuda com o meu filho.

Agradeço ao meu orientador que foi excepcional comigo.

Agradeço a minha coorientadora por toda ajuda.

Agradeço meus amigos que sempre me apoiam e aos colegas que colaboraram de alguma maneira com esse trabalho.

Agradeço aos técnicos do Laboratório Multiusuário de Apucarana (LAMAP) por toda ajuda na realização das análises.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa fornecida.

BUENO, Luana Maria Moreira Godoy. **Carvão ativado a partir de resíduo têxtil: síntese, caracterização e aplicação na remoção de corante reativo e disperso em efluente têxtil**. 2023. 71 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2023.

RESUMO

Estima-se que a indústria têxtil consuma 98 milhões de toneladas de recursos não renováveis a cada ano, diante disso, reduzir impactos ambientais nocivos dos têxteis é um desafio que toda a cadeia têxtil deve realizar, desde a escolha de produtos a serem utilizados em seus processos, tratamento de águas residuárias, assim como, o reaproveitamento de matérias-primas. O processo de adsorção tornou-se uma das principais técnicas nos métodos de tratamento de efluentes industriais, sendo um dos métodos mais eficazes. Carvões ativados, são um dos materiais adsorventes mais utilizados em processos de adsorção para remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos. Vários adsorventes alternativos de baixo custo produzidos a partir de resíduos sólidos agrícolas, resíduos sólidos industriais, subprodutos agrícolas e biomassa são usados como adsorventes para o tratamento de adsorção de águas residuais de corantes, incluindo resíduos industriais têxteis. Com isso, no presente trabalho foi proposto a produção de um material carbonáceo utilizando um resíduo têxtil (pó de filtro), para aplicação na remoção de corantes. O carvão ativado (CA) obtido, foi ativado quimicamente com H_3PO_4 e produzido pelo processo de pirólise lenta, resultando em um rendimento de pirólise satisfatório ($52,72 \pm 0,125\%$), foi caracterizado por análise termogravimétrica (TGA), infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), isotermas de adsorção-dessorção de N_2 , ponto de carga zero (pH_{PCZ}) e usado como material adsorvente em soluções aquosas de corante reativo amarelo 160 e corante disperso amarelo 211. O CA produzido apresentou área específica BET ($S_{BET}=2146.719 \text{ m}^2/\text{g}$). Os ensaios de adsorção apresentaram uma remoção de 89% para a solução de corante reativo, 50% para a solução de corante disperso e 67,51% para uma terceira solução contendo os dois tipos de corantes. Desse modo, os resultados obtidos sugerem a viabilidade da utilização desse resíduo têxtil como material precursor para a produção de CA e sua aplicabilidade na remoção de corantes têxteis.

Palavras-chave: resíduo de pó de filtro; material carbonáceo; adsorção; remoção de corante; indústria têxtil.

BUENO, Luana Maria Moreira Godoy. **Activated carbon from textile waste: synthesis, characterization and application in the removal of reactive and disperse dye in textile effluent.** 2023. 71 pg. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2023.

ABSTRACT

It is estimated that the textile industry consumes 98 million tons of non-renewable resources each year, before reducing environmental impacts of textiles is a challenge that the entire textile chain must undertake, from the choice of products to be used in its processes, wastewater treatment, as well as, the reuse of raw materials. The adsorption process has become one of the main techniques in industrial effluent treatment methods, being one of the most effective methods. Activated carbons are one of the adsorbent materials most used in adsorption processes to remove organic and inorganic contaminants. Various low-cost alternative adsorbents produced from agricultural solid waste, industrial solid waste, agricultural by-products and biomass are used as adsorbents for the adsorption treatment of dye wastewater, including textile industrial waste. Therefore, in the present work it was proposed the production of a carbonaceous material using textile residue (filter powder), for application in the removal of dyes. The activated carbon (CA) obtained was chemically activated with H_3PO_4 and produced by the slow pyrolysis process, resulting in a satisfactory yield ($52.72 \pm 0.125\%$), was characterized by thermogravimetric analysis (TGA), Fourier transform infrared (FTIR), scanning electron microscopy (MEV), N_2 adsorption-desorption isotherms, point of zero charge (pH_{PCZ}) and used as adsorbent material in aqueous solutions of reactive yellow 160 dye and disperse yellow 211 dye. The produced CA presented BET specific area ($SBET=2146.719 \text{ m}^2/\text{g}$). The adsorption tests showed a removal of 89% for the reactive dye solution, 50% for the disperse dye solution and 67,51% for a third solution containing both types of dyes. Thus, the results obtained suggest the feasibility of using this textile waste as a precursor material for the production of CA and its applicability in the removal of textile dyes.

Key words: filter dust residue; carbonaceous material; adsorption; dye removal; textile industry.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Cadeia produtiva têxtil	16
FIGURA 2: Fiações de algodão no Brasil.....	17
FIGURA 3: Processos de fiação.....	20
FIGURA 4: Resíduos do processo de fiação de algodão	20
FIGURA 5: Máquina desempoeiradora DUSTEX SP-DX - Trützschler	21
FIGURA 6: Resíduo de pó de filtro do setor de fiação	21
FIGURA 7: Estrutura química <i>C.I Reactive Yellow 160</i>	23
FIGURA 8: Estrutura química <i>C.I Disperse Yellow 211</i>	24
FIGURA 9: <i>C.I.Disperse Yellow 211</i> e <i>C.I.Reactive Yellow 160</i>	34
FIGURA 10: Processo de produção do CA.	34
FIGURA 11: Micrografias do material precursor.....	43
FIGURA 12: Micrografias do CA	43
FIGURA 13: Isotermas de adsorção-dessorção do CA.....	44
FIGURA 14: Curvas termogravimétricas das amostras do material precursor e CA .	46
FIGURA 15: FTIR pó de filtro	48
FIGURA 16: FTIR CA.....	48
FIGURA 17: Ponto de carga zero.....	50
FIGURA 18: Comprimento de onda das soluções de corante.....	51
FIGURA 19: Curva padrão do corante <i>C.I Disperse Yellow 211</i>	51
FIGURA 20: Curva padrão do corante <i>C.I Rective Yellow 160</i>	52
FIGURA 21: Adsorção variando pH	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Tratamento de efluentes têxteis.....	25
TABELA 2: Adsorventes utilizados na Indústria Têxtil.....	28
TABELA 3: Adsorventes utilizados na remoção de corantes dispersos e reativos....	29
TABELA 4: CA utilizados para tratamentos de efluentes têxteis	31
TABELA 5: Rendimento das produções de CAs reportados em outras literaturas....	41
TABELA 6: Análise centesimal de CAs reportados em outras literaturas	42
TABELA 7: Propriedades texturais dos CAs reportadas em outras literaturas	46
TABELA 8: Valores dos parâmetros obtidos pelo ajuste linear das curvas analíticas experimentais	52
TABELA 9: Remoção de corantes com materiais adsorventes reportados em outras literaturas.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Carvão ativado
L	Litros
Kg	Quilogramas
CO	Algodão
PES	Poliéster
DMT	Dimetil Tereftalato
MEG	Monoetilenoglicol
PTA	Ácido Tereftálico Puro
CO ₂	Dióxido de carbono
NBR	Norma Técnica Brasileira
COCARI	Cooperativa Agropecuária e Industrial
COPASUL	Cooperativa Agrícola Sul Matogrossense
C.I	<i>Color Index Generic Name</i>
DBO	Demanda biológica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
TSS	Sólidos Totais Suspensos
TDS	Sólidos Totais Dissolvidos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
C _e	Concentração de soluto na fase líquida
q _e	Capacidade de adsorção do adsorvente
V	Volume
C _o	Concentrações iniciais
M	Massa
H ₂ O	Água
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COCAMAR	Cooperativa Agroindustrial de Maringá
H ₃ PO ₄	Ácido Fosfórico
mL	Mililitros
g	Gramas
h	Horas

N ₂	Gás Nitrogênio
S _{BET}	Análise superficial BET
V _T	Volume total de poro
V _{micro}	Volume de microporo
V _{meso}	Volume do mesoporo
D _P	Diâmetro de poro
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
TGA	Análise termogravimétrica
FTIR	Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier
ATR	Refletância total atenuada
PCZ	Potencial de carga zero
NaCl	Cloreto de sódio
HCl	Ácido clorídrico
NaOH	Hidróxido de sódio
C _{fixo}	Carbono fixo
U	Umidade
V	Voláteis
C	Cinzas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ppm	Partes por milhão
nm	Nanômetros
Abs _i	Absorbância da solução antes do tratamento
Abs _f	Absorbância da solução após o tratamento
mg.L ⁻¹	Miligramas por litro
rpm	Rotação por minuto
C _f	Concentrações final

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL	16
2.2 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL	18
2.2.1 Pó de filtro	19
2.2.2 Efluente têxtil.....	22
2.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	25
2.3.1 Adsorção	26
2.3.1.1 Carvão ativado	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 MATERIAL	34
3.2 MÉTODOS	34
3.2.1 Síntese do carvão ativado	34
3.2.1.1 Preparação do precursor	35
3.2.1.2 Ativação e carbonização (pirólise).....	35
3.2.2 Análise gravimétrica	35
3.2.3 Propriedades texturais e morfológicas do CA	36
3.2.3.1 Análise centesimal.....	36
3.2.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	38
3.2.3.2 Adsorção/Dessorção de N ₂	38
3.2.3.3 Análise termogravimétrica (TGA).....	38
3.2.3.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de fourier (FTIR)	39
3.2.3.5 Potencial de carga zero (PCZ)	39
3.2.4 Processo de adsorção.....	39
3.2.4.1 Análise espectrofotometria uv-visível	39
3.2.4.2 pH.....	40
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	41
4.1 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA.....	41

4.2 ANÁLISE CENTESIMAL	42
4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	42
4.4 ADSORÇÃO/DESSORÇÃO DE N ₂	44
4.5 ANÁLISE TGA.....	46
4.6 FTIR	47
4.7 POTENCIAL DE CARGA ZERO (PCZ).....	50
4.8 TESTE DE ADSORÇÃO	50
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é uma das maiores poluidoras do mundo, impactando negativamente o ambiente por meio do uso excessivo de recursos naturais (água, terra e muitos outros) e de vários produtos químicos (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019; PALACIOS-MATEO *et al.*, 2021, ISLAM *et al.*, 2020).

Estima-se que a indústria têxtil consuma 98 milhões de toneladas de recursos não renováveis a cada ano (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). Diante disso, reduzir impactos ambientais nocivos dos têxteis é um desafio que toda a cadeia têxtil deve realizar, desde a escolha de produtos a serem utilizados em seus processos, tratamento de águas residuárias, assim como, o reaproveitamento de matérias-primas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017; EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2019).

Várias práticas para a melhoria dos processos têxteis estão sendo realizadas, como: processos que reutilizem corantes, utilização de fibras curtas para produção de fios, desfibragem de tecidos e malhas para produção de novos materiais, moda circular, dentre outras (AKTER *et al.*, 2022). No entanto, essas ações ainda são consideradas incipientes. De acordo com Luoma *et al.* (2022), apenas 13% do material usado no vestuário é reciclado e destinado, principalmente, para aplicações de menor valor. Um problema ainda maior, o consumo de água. Por isso, o tratamento de águas utilizadas na indústria têxtil deve ser pesquisado e ser considerado uma alternativa para diminuição de impactos ambientais.

Para produzir 1 tonelada de produto têxtil, se consome de 200 a 270 toneladas de água, sendo gerados nas etapas de tingimento e beneficiamento, em média 50 a 100L de efluente por quilo de tecido produzido (BELTRAME, 2000). De acordo com o relatório do Banco Mundial, aproximadamente 20% das águas residuais das indústrias têm origem na indústria têxtil (TAVANGAR *et al.*, 2019).

Assim sendo, deve-se entender os *stakeholders* envolvidos nos processos têxteis e procurar formas de melhorias tornando-os mais sustentáveis. Uma das etapas que mais poluem e trazem problemas ambientais são os processos de: preparação, tingimento e acabamento (KESKIN *et al.*, 2021). A literatura reporta diversos tipos de poluentes que causam impactos ambientais negativos, de insumos utilizados em processos de tingimento na indústria têxtil. Outro fator alarmante é a grande quantidade de água que é desperdiçada durante o processo de tingimento

na forma de água colorida, denominado efluente têxtil (SHARMA; SHARMA; SONI, 2021). Uma quantidade significativa de corantes não se fixa à fibra durante o processo de tingimento e acabam permanecendo nas águas residuais do tingimento têxtil (SHARMA; SHARMA; SONI, 2021).

Neste efluente, encontram-se os corantes, que são quimicamente estáveis e não são facilmente degradáveis ao longo do tempo. Além disso, alguns deles podem sofrer alterações biológicas e químicas para produzir subprodutos mais tóxicos. Portanto, a água tingida deve ser tratada adequadamente antes de ser lançada em corpos d'água (ABDULRAZZAQ; AL-SABBAGH; SHANSHOOL, 2021). A remoção de contaminantes perigosos antes da descarga no meio ambiente é um problema desafiador e uma prioridade global que vem aumentando com o passar dos anos. Dessa forma, o desenvolvimento de métodos sustentáveis para remediação de efluentes têxteis vem ganhando destaque nos últimos anos (MOTAMEDI *et al.*, 2021).

A disponibilidade das matérias-primas utilizadas na produção do carvão ativado (CA) pode torná-lo abundante e relativamente barato. Nas últimas décadas, cientistas têm se interessado pelo reaproveitamento de resíduos ou subprodutos para atuarem como produtos ecologicamente corretos. Assim, alguns resíduos agrícolas e industriais têm sido utilizados para a produção de CA (MEDHAT *et al.*, 2021). O principal desafio da produção de CA envolve a acessibilidade a precursores renováveis (JAWAD *et al.*, 2021).

Dentro da indústria têxtil, um resíduo promissor para a produção de CA é o pó de filtro, gerado durante o processo de limpeza no setor de fiação de fibras de algodão, que gera um volume muito grande, não possui destinação com valor agregado, além de possuir o algodão, que está entre as fibras têxteis mais utilizadas no mundo.

Em indústrias têxteis verticalizadas que possuem tanto o processo de fiação quanto o de tingimento, o carvão ativado produzido a partir do resíduo de pó de filtro gerado pela fiação, pode ser empregado para o processo de tratamento de efluentes, originado do tingimento dos fios ou tecidos, no caso de empresas que possuem os setores de tecelagem ou malharia.

No presente estudo, realizou-se a produção de CA, utilizando o resíduo de pó de filtro como material precursor, fez-se a caracterização do mesmo e o empregou-se o mesmo na adsorção de soluções de corantes têxteis.

1.1 JUSTIFICATIVA

Gerando em torno de 50 a 100 litros (L) de efluente por quilograma (Kg) de tecido produzido, as indústrias têxteis, em particular, utilizam uma variedade de corantes sintéticos que possuem afinidade química com fibras têxteis para fins de tingimento de roupas (SILVA *et al.*, 2018).

Uma quantidade significativa destes corantes não se fixam a fibra durante o processo de tingimento e acabam permanecendo nas águas residuais do tingimento têxtil. Esses corantes, tóxicos, podem permanecer no ambiente por um longo período quando liberados sem tratamento adequado. Sem purificação ou tratamento, a presença de corantes nos efluentes têxteis causam sérios problemas (SHARMA; SHARMA; SONI, 2021).

Um desses problemas é o impedimento da penetração da luz solar na água, o que leva a uma queda nos níveis de oxigênio da água na fotossíntese e a interrupção da fotossíntese, por alterar parâmetros físico-químicos, em humanos e na fauna aquática, prejudicando a qualidade dos ambientes aquáticos receptores (MEHRA; SINGH; CHADHA, 2021). Portanto, vários métodos de tratamento primário, secundário e terciário estão disponíveis para tratar o efluente têxtil.

Os tratamentos de efluentes têxteis são categorizados em três tipos principais: físicos, químicos, físico-químicos e biológicos. Dentre os métodos citados, o processo de adsorção é um método químico conveniente para o tratamento de efluentes industriais com baixo custo operacional, baixos problemas de incrustação e a forma mais econômica de remoção de metais pesados do efluente industrial (VELUSAMY *et al.*, 2021).

Devido ao alto custo e fonte não renovável de CA comercialmente disponível, pesquisadores têm estudado a produção de carvões ativados a partir de precursores acessíveis e renováveis (CAZETTA *et al.*, 2011). Dentre estas matérias-primas, o pó de filtro é um potencial precursor para a produção de CA, pois o algodão pelo qual é formado na sua maioria, está entre as fibras têxteis utilizadas no mundo.

Com isso foi obtido CA a partir de pó de filtro de fiação com um bom rendimento e ótimas caracterizações para maior eficiência no processo de adsorção de remoção de cor dos corantes reativo amarelo 160 e disperso 211.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Realizar estudos do processo de adsorção com corantes reativo e disperso utilizando carvão ativado produzido a partir do resíduo têxtil de pó de filtro.

1.2.2 Objetivos específicos

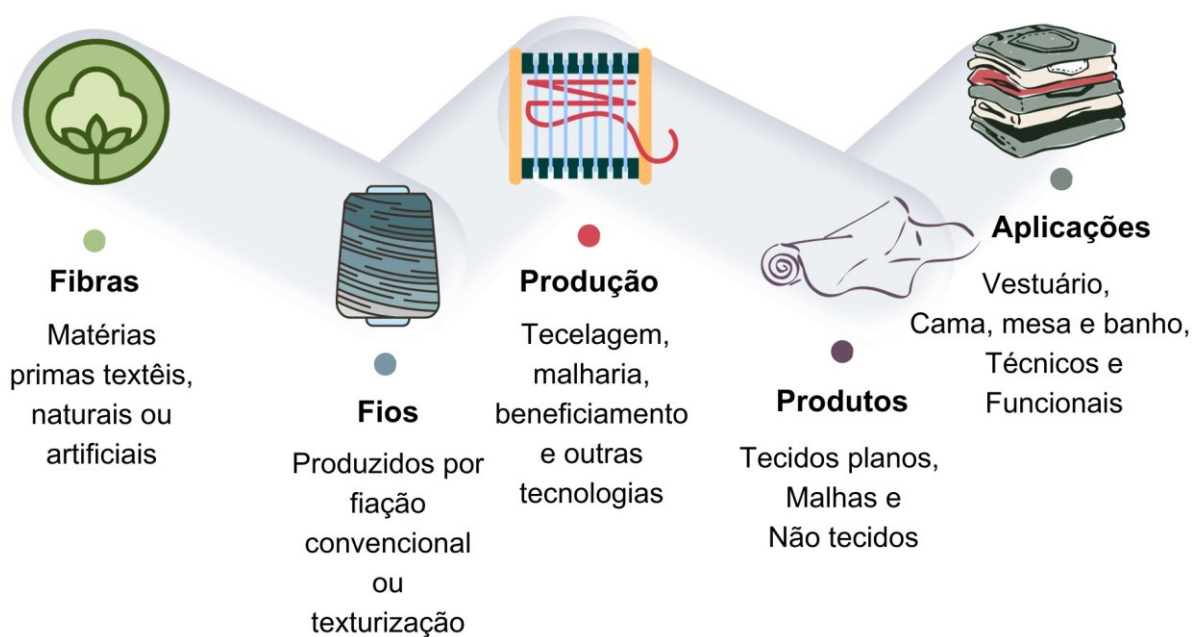
- Caracterizar o carvão ativado obtido com técnicas de Análise Centesimal; Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Análise Termogravimétrica (TGA), Adsorção e Dessorção de N₂, Espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), Potencial de Carga Zero (PCZ);
- Realizar o processo de adsorção nas soluções de corante *C.I Reactive Yellow 160* e *C.I Disperse Yellow 211*;
- Avaliar a efetividade do CA produzido como material adsorvente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

A cadeia produtiva têxtil é dividida em setores conforme é apresentado na Figura 1, em que o produto gerado em um processo, serve de matéria-prima para o processo seguinte, até chegar ao produto final. O Brasil possui a maior e mais completa Cadeia Têxtil do Ocidente, apresentando desde a produção das fibras, como plantação de algodão, até os desfiles de moda, passando por fiações, tecelagens, beneficiadoras, confecções e forte varejo (ABIT, 2022).

FIGURA 1: Cadeia produtiva têxtil



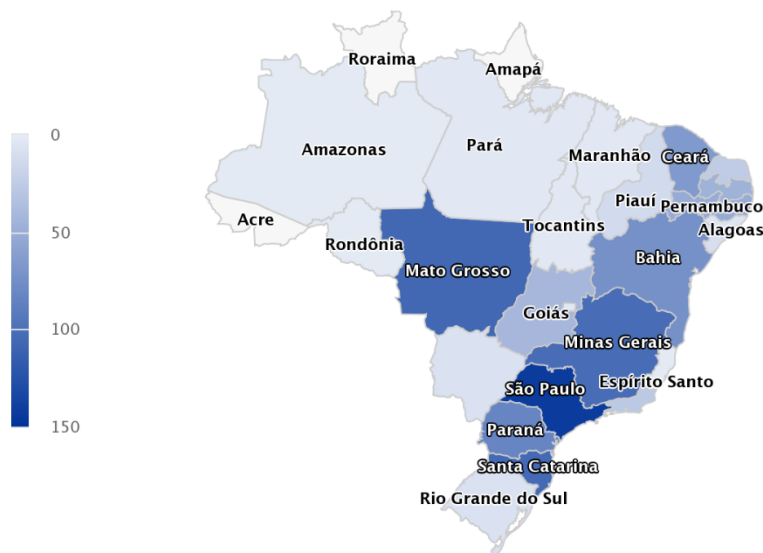
FONTE: Adaptado de Nawab e Shaker (2016).

O mercado produtivo têxtil no Brasil, apresentou um faturamento da cadeia têxtil e de confecção de R\$190 bilhões em 2021, com investimentos no setor de R\$ 4,9 bilhões em 2021, exportações (sem fibra de algodão):US\$ 1,14 bilhão em 2022, importações (sem fibra de algodão):US\$ 5,9 bilhões em 2022, produção da confecção (vestuário, meias e acessórios, linha lar e artigos técnicos): 8,1 bilhões de peças em 2021, volume da produção têxtil: 2,16 milhões de toneladas em 2021 (ABIT, 2022).

O algodão (CO) está entre as mais importantes culturas de fibras do mundo. Todos os anos, uma média de 35 milhões de hectares de algodão são plantadas em todo o planeta, sendo que a demanda mundial tem aumentado gradativamente desde a década de 1950, a um crescimento anual médio de 2%, levando o comércio mundial do algodão a movimentar anualmente cerca de US\$ 12 bilhões e envolver mais de 350 milhões de pessoas em sua produção, desde as fazendas até a logística, descaroçamento, processamento e embalagem, sendo atualmente, produzido por mais de 60 países, nos cinco continentes e nos últimos anos, o Brasil tem se mantido entre os cinco maiores produtores mundiais de algodão, ao lado de países como China, Índia, EUA e Paquistão e está entre os maiores exportadores mundiais, produtores e consumidores mundiais de algodão em pluma (ABRAPA, 2023).

De acordo com a ECONODATA (2023), no Brasil, há 652 empresas de preparação e fiação de fibras de algodão espalhadas pelo país, conforme é apresentado na Figura 2.

FIGURA 2: Fiações de algodão no Brasil



FONTE: ECONODATA (2023).

No âmbito da produção de manufaturados, o algodão enfrenta a concorrência principalmente das fibras sintéticas, cuja participação relativa no consumo total de fibras vem aumentando desde a sua criação na primeira metade do século XX. Na medida do desenvolvimento de suas aplicações, as fibras sintéticas tornaram-se uma necessidade em função de dois fatores: o crescimento populacional, que

passou a exigir maior rapidez a custos mais baixos para o atendimento da demanda por vestuários, e a redução da vulnerabilidade da indústria têxtil às possíveis dificuldades da produção agrícola. O poliéster é a mais consumida e a mais barata das fibras, sejam químicas ou naturais. Assim, o algodão tem maior instabilidade nos preços, o que constitui um fator determinante na concorrência com as fibras sintéticas, cujas cotações são mais fáceis de serem previstas (*Textile Exchange*, 2023).

Diante disso, as duas fibras mais consumidas no mundo são o algodão e o poliéster e, conseqüentemente, esse material é tinto, fazendo com que os corantes utilizados para o tingimento dessas fibras sejam os mais consumidos. Dessa forma, as estações de tingimento, principalmente, que fazem uso desses corantes são grandes poluidoras, devido à alta demanda dessas fibras como já mencionado.

Apesar de reconhecida como uma atividade primordial, a indústria têxtil é também identificada como um setor problemático para o meio ambiente. Os impactos ambientais causados são desde elevados níveis de consumo de água e energia, emissão de dióxido de carbono (CO₂), elevado uso de recursos não renováveis, geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos e gasosos durante os processos produtivos (PINTO, 2023).

2.2 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA TÊXTIL

Como mencionado, a indústria têxtil pode causar grandes impactos ambientais. No entanto, alguns dos resíduos gerados podem ser estudados e serem considerados matéria-prima para produção de novos materiais. Durante os processos realizados nos setores da indústria têxtil, resíduos sólidos, líquidos e gasosos são gerados. De acordo com a Norma Técnica Brasileira (NBR) 10.004, 30 de novembro de 2004, Resíduos sólidos – Classificação, define resíduos sólidos como:

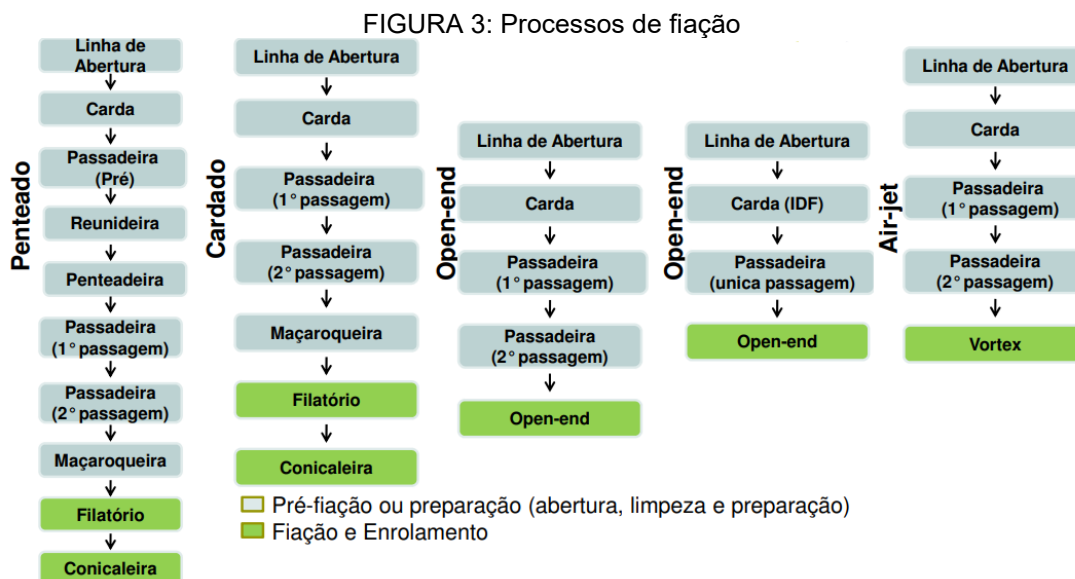
Resíduos nos estados sólidos e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2004, pg 1).

Dentre estes materiais, pode-se destacar a grande quantidade de resíduo de algodão em diferentes estágios de processamento (LIMA *et al.*, 2019), desde o processamento de fiação, tecelagem até as confecções, variando estes rejeitos quanto à composição e quantidade (NARITA, 2022). Este resíduo, em destaque, pode ser utilizado como matéria-prima para produção de novos materiais e ainda, aplicá-lo na remoção de outros resíduos, tornando o processo mais sustentável e rentável.

No setor de tingimento, para cada 1 tonelada de tecidos tintos se fazem necessários cerca de 150 m³ (metros cúbicos) de água. Em uma fábrica de tamanho médio, que consegue processar 8000 kg de tecidos todos os dias, são consumidos diariamente 1,6 milhão de litros de água, em torno de 280.000 toneladas de corantes têxteis são dispersados como efluentes industriais a cada ano (SOUZA; MENEZES; BARATA, 2021).

2.2.1 Pó de filtro

No setor de fiação, ocorre o processo de transformação mecânico, onde as fibras são empregadas para formarem fios. O algodão em pluma é processado nos abridores, batedores, cardas, passadores, penteadeiras, maçaroqueiras, filatórios, retorcedeiras e conicaleiras, a escolha do maquinário sempre depende de qual o tipo de fio que se obterá, conforme é apresentado na Figura 3.



FONTE: Adaptado de SENAI (2018).

Considerando um processo de fiação 100% CO, os resíduos de algodão são gerados durante todo o processo de fiação, conforme é apresentado na Figura 4.

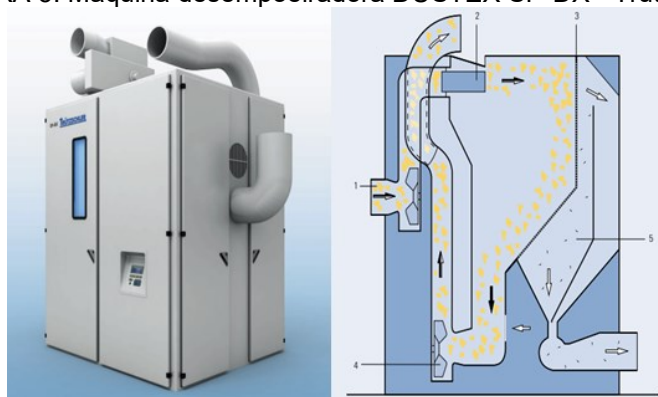
FIGURA 4: Resíduos do processo de fiação de algodão



FONTE: TRUTZSCHLER (2023).

Na linha de abertura ocorre a separação da fibra de materiais estranhos que a ela estão ligadas. Antes e durante o processo de cardagem, a limpeza continua visando conseguir boa regularidade dos fios sem redução na massa fibrosa por unidade de comprimento. Nesses processos, sistemas de filtragem fazem a coleta de folhas, sementes, impurezas da linha de abertura e fibrilas de algodão (SENAI, 2018). Na Figura 5, é apresentado um sistema de desempoeiramento no qual é filtrado fibrilas de algodão, denominado resíduo de pó de filtro.

FIGURA 5: Máquina desempoeiradora DUSTEX SP-DX - Trützschler



FONTE: Adaptado de Trützschler (2023).

O pó de filtro (Figura 6) é composto por celulose (fibrilas de algodão), lignina (cascas e fragmentos de talo) e materiais inorgânicos (poeira) (LOURENÇO; SILVA, 2018). Cerca de 8% do total de algodão processado durante o processo de fiação, se torna resíduo, sendo inconvenientes por ocuparem grandes espaços e por possuírem baixa taxa de decomposição no solo representando um sério problema para a indústria têxtil, em relação ao seu descarte em aterros (HOLTZ *et al.*, 2009).

FIGURA 6: Resíduo de pó de filtro do setor de fiação



FONTE: Autora (2023).

De acordo com a Cooperativa Agropecuária e Industrial (COCARI) (2022), durante o processo de fiação de cerca de 300.000 kg/mês de fio, a empresa gera 7.000 kg/mês de resíduos de pó de filtro, que são descartados na caldeira da empresa. Segundo a Cooperativa Agrícola Sul Matogrossense (COPASUL) (2023), a

produção mensal é em torno de 2.000 toneladas/mês de fios, gerando 29.010 kg/mês de resíduo de pó de filtro, que são doados para consumo animal.

Devido a grande quantidade de resíduo de pó de filtro gerado na produção de fios nas fiações de algodão e a composição do mesmo, este torna-se um material precursor promissor para a obtenção de materiais carbonáceos, podendo assim ser aplicado em outras etapas para retirar substâncias do efluente gerado.

Após o processo de fiação, tem-se os setores de malharia e tecelagem, na qual ocorre a produção de malhas e tecidos, respectivamente. Beneficiamentos primários e secundários (tingimento e estamparia) são realizados, contribuindo significativamente para a produção de efluente têxteis altamente coloridos.

2.2.2 Efluente têxtil

O processo de tingimento é uma modificação físico-química do substrato, de forma com que a luz refletida provoque uma percepção de cor. Os produtos denominados matérias corantes, são os que provocam essa modificação. Matérias corantes são compostos orgânicos capazes de colorir substratos têxteis ou não têxteis, de forma que a cor seja relativamente resistente (sólida) à luz e a tratamentos úmidos, podendo ser classificados em corantes e pigmentos (SALEM, 2010).

Segundo Salem (2010), os corantes são solúveis ou dispersáveis no meio de aplicação, água. No tingimento, os corantes são adsorvidos e se difundem para o interior da fibra, havendo interações físico-química entre corante e fibra. No entanto, parte dos corantes não são adsorvidos pela fibra, ficando no banho de tingimento e sendo descartado. O processo de adsorção depende do tipo de corante, maquinário, parâmetros de processo e a composição da fibra. Cada fibra tem substantividade para determinados corantes, mas todos apresentam-se como estruturas aromáticas.

Essas estruturas moleculares aromáticas complexas no corante, o tornam mais estáveis, resistentes à luz, água e agentes oxidantes e, portanto, são difíceis de degradar quando liberados em sistemas aquáticos (SIDDIQUE; FAROOQ; SHAHEEN, 2011). Assim, representam um importante organopoluente tóxico e recalcitrante (SILVA *et al.*, 2017).

Dentre estes corantes podem-se destacar o corante reativo, um dos corantes mais empregados no mundo e o corante disperso. Eles são usados extensivamente

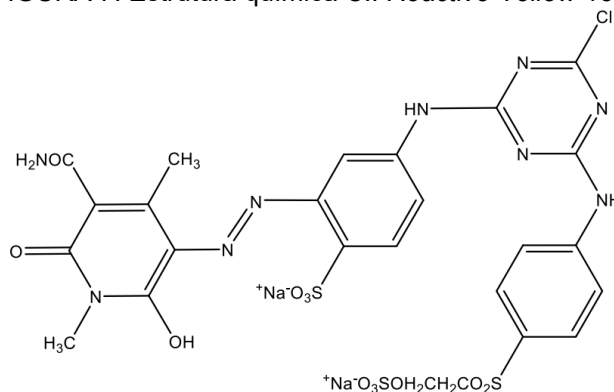
nas indústrias têxteis em relação às características favoráveis de cores brilhantes, técnicas de aplicação simples e resistentes à água com baixo consumo de energia (SIDDIQUE; FAROOQ; SHAHEEN, 2011).

O consumo global de têxteis é denominado por materiais a base de CO e PES, sendo improvável que esta situação se altere num futuro próximo. Assim, a inovação contemporânea de produtos e processos tem se concentrado no tingimento de fibras celulósicas, poliéster e suas misturas PES/CO. Portanto, não é surpreendente que o atual mercado global de corantes seja dominado por corantes para estes dois tipos de fibras, nomeadamente corantes reativo para CO e corantes dispersos para PES. Sendo que, cerca de 24% do número total de corantes listados pelo *Color Index Generic Name* (C.I), são de corantes reativos e dispersos (BURKINSHAW, 2016). Os motivos supracitados, explicam a utilização dos mesmos nessa pesquisa.

A estrutura do corante reativo é constituída por três partes: um grupo cromóforo que compreende uma unidade de grupamento azo, nitro ou antraquinona que é a parte responsável pela cor; grupamentos solubilizantes que são sulfônicos e definem além da solubilidade do corante, as características de migração, substantividade e lavabilidade; e os grupos reativos que são os grupamentos livres e tendem a reagir com outros grupos, como exemplo com as hidroxilas (- OH) das fibras celulósicas (SALEM,2010).

Dentre os corantes, pode-se destacar o corante reativo *C.I.Reactive Yellow 160*, que apresenta fórmula molecular $C_{25}H_{22}ClN_9Na_2O_{12}S_3$ (Figura 7) e massa molecular 818,13 g/mol.

FIGURA 7: Estrutura química *C.I Reactive Yellow 160*

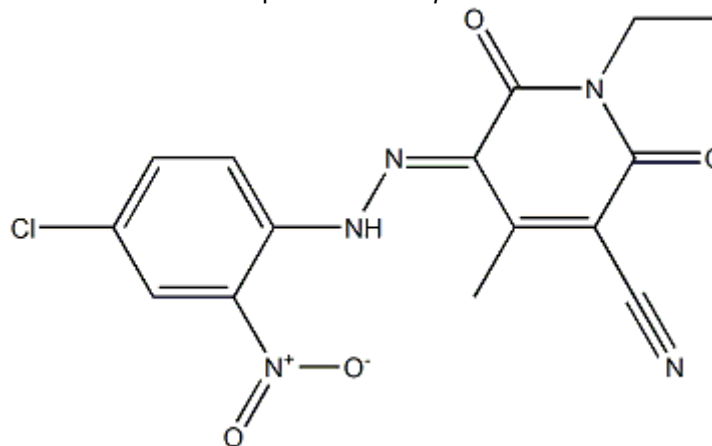


FONTE: Autora (2023).

Já os corantes dispersos possuem estrutura química diferenciada quando comparada aos corantes reativos, os corantes dispersos possuem uma solubilidade aquosa pequena. No entanto essa permite que sejam aplicados ao PES na forma de dispersão aquosa fina sem a presença de agentes dispersantes (SALEM, 2010).

Como grupo cromóforo pode-se destacar: o antraquinônico e o azo. Neste caso, destacaremos o corante *C.I Disperse Yellow 211* que apresenta fórmula molecular $C_{24}H_{17}N_3O_4$ (Figura 8) e massa molecular 411,41 g/mol.

FIGURA 8: Estrutura química *C.I Disperse Yellow 211*



FONTE: Autora (2023)

No entanto, um efluente têxtil contém muito mais produtos químicos, pois para um bom tingimento há necessidade de: correção de pH, umectação da fibra, retardamento da substantividade corante fibra, reação corante/fibra, dentre outros.

Assim, o efluente têxtil contém: solventes clorados, solventes de hidrocarbonetos, solventes oxigenados, solos, resíduos de tecidos embebidos em graxa e óleo, juntamente com corantes e pigmentos que são utilizados em várias etapas da fabricação têxtil (VELUSAMY *et al.*, 2021). De 10 até 15% dos corantes utilizados para o processo de tingimento, não são absorvidos pelas fibras têxteis e são lançados em águas residuais (MOUSSAVI; MAHMOUDI, 2009). A cor escura e a alta turbidez desses efluentes interferem na transmissão da luz solar através da água, diminuem a quantidade de oxigênio dissolvido e perturbam o nível de pH (SLAMA *et al.*, 2021).

2.3 TRATAMENTO DE EFLUENTES

Atualmente existem várias tecnologias para tratar a remoção de corantes de soluções aquosas (ABDULRAZZAQ; AL-SABBAGH; SHANSHOOL, 2021), alguns exemplos são apresentados na Tabela 1. Os sistemas tradicionais de tratamento de efluentes podem ser divididos em métodos biológicos, químicos e físicos. Podem existir ainda, sistemas híbridos, consistindo de combinações de processos físico-químicos como precipitação, coagulação-floculação, adsorção por carvões ativados, troca iônica, processos químicos, entre outros (LOTITO et al., 2014, CHEN *et al.*, 2005, BABU *et al.*, 2007 e SOMENSI *et al.*, 2010).

TABELA 1: Tratamento de efluentes têxteis

Método utilizado	Corante removido	Autor
Adsorção	Corantes reativos diretos, ácidos, básicos e vinílicos sulfônicos	(OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2023)
Processo Fenton	Corante laranja ácido sintético 52	(RASHID <i>et al.</i> , 2020)
Co-plantação	Corante Scarlet RR	(KADAM <i>et al.</i> , 2018)
Eletrocoagulação e Microflotação	Corante verde malaquita (MG)	(ABDULRAZZAQ; AL-SABBAGH; SHANSHOOL, 2021).
Degradação fotocatalítica	Corante aniônico laranja de metila (MO)	(NAVADA <i>et al.</i> , 2021).
Enzima lacase termo-halotolerante	Amarelo de alizarina, Vermelho congo, Carmim, Verde brilhante, Cristal violeta, Verde metilo, Azul de bromofenol, Azul de bromotimol	(MOTAMEDI <i>et al.</i> , 2021).
Biodegradação	Remazol Yellow RR (RYRR), Joyfix Red RB (JRRB) e Reactive Yellow F3R (RYF3R)	(SRINIVASAN; SADASIVAM, 2021).

FONTE: Autora (2022).

A escolha do processo ou da combinação de processos de tratamento, dependem de uma série de fatores como características do efluente, qualidade do

efluente após o tratamento, custos, disponibilidade de área e disponibilidade tecnológica (HASSEMER, 2000).

O processo de adsorção é um método comumente utilizado para tratamento de efluentes industriais (VELUSAMY *et al.*, 2021). Segundo Medhat *et al.* (2021), o método de adsorção para tratamento de efluentes é um dos métodos mais eficazes, podendo ser empregados para tratamento de efluentes têxteis (CSERI *et al.*, 2021; ALIZADEH; SHARIATI; BESHARATI, 2017; ZHAO *et al.*, 2021; ONU *et al.*, 2021; AL-MUSAWI *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2018; NIZAM *et al.*, 2021; MÉTIVIER-PIGNON; FAUR-BRASQUET; CLOIREC, 2003).

2.3.1 Adsorção

O processo de adsorção é uma operação de transferência de massa, a qual efetua-se a habilidade de certos sólidos em concentrar na sua superfície determinadas substâncias existentes em fluidos líquidos ou gasosos, possibilitando a separação dos componentes desses fluidos (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Segundo VELUSAMY *et al.*, (2021), o processo de adsorção acontece quando um soluto líquido (adsorbato) é adsorvido em alguma superfície sólida (adsorvente), podendo ser física ou química, dependendo da interação entre o adsorbato e os adsorventes. O mesmo, visa a adsorção de compostos de baixo peso molecular como os corantes (MÉTIVIER-PIGNON; FAUR-BRASQUET; CLOIREC, 2003).

Os fenômenos de adsorção são resultados de uma combinação entre os tipos de forças envolvidas na adsorção física e química. Desta forma, são vários os fatores que influenciam o processo de adsorção como a área de contato, as propriedades do adsorvente e do adsorbato, a temperatura do sistema, natureza do solvente e o pH do meio (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

A capacidade de adsorção é um índice importante para avaliar o efeito de adsorção do adsorvente (KUANG; ZHANG; ZHOU, 2020). Segundo Métivier-Pignon, Faur-Brasquet e Cloirec (2003), a cinética e isotermas de adsorção são realizadas para obter valores experimentais de velocidade e capacidades de adsorção. A partir do estudo do equilíbrio de adsorção é possível obter a isoterma de adsorção, que é um parâmetro importante para fornecer informações sobre a distribuição de adsorbato na superfície do material adsorvente, bem como estimar sua capacidade de adsorção (SILVA *et al.*, 2016).

No desenvolvimento de materiais adsorventes, a caracterização pode ocorrer basicamente em dois momentos distintos: a) Na etapa de preparação do material adsorvente; b) Após o ensaio de adsorção para verificar de que forma o adsorbato interage com o material adsorvente. Na etapa de preparação, a caracterização tem por objetivo a confirmação de propriedades físico-químicas, tais como: área específica e distribuição de poro através de adsorção de gases; verificação de mudança nas cargas superficiais do material por potencial zeta ou potencial de carga zero; estabilidade térmica dos materiais adsorventes por análises termométricas; incorporação de determinado grupo funcional ativo como sítio de adsorção por técnicas espectroscópicas; determinação de cristalinidade e identificação de fases por técnicas de difração; verificação da topologia do material adsorvente por microscopia eletrônica. Após a etapa de adsorção, é importante a verificação de como o adsorbato interage com o adsorvente e diversas técnicas podem ser tomadas para este fim, sendo as técnicas espectroscópicas mais utilizadas (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Diferentes materiais são utilizados como adsorventes para o processo de adsorção de corantes, alguns exemplos são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2: Adsorventes utilizados na Indústria Têxtil

Adsorvente	Adsorvato	Objetivo do estudo	Referência
Membranas nanofibras preparadas a partir de poliamidas aprimoradas com propriedades de troca iônica	Safranina O (SO), rodamina B (RH), vermelho de metila (MR), laranja de metila (MO), rosa de bengala (RB), vermelho do Congo (CR) e vermelho direto 80 (DR)	Membranas nanofibras adsorptivas eletrofiadas de polímeros de troca iônica para capturar corantes têxteis de águas Residuais	(CSERI <i>et al.</i> , 2021)
Folhas de Azolla e Figo Modificadas com Nanopartículas de Óxido de Ferro Magnetita	Violeta Cristal	Adsorção de Cristal Violeta em Folhas de Azolla e Figo Modificadas com Nanopartículas de Óxido de Ferro Magnetita	(ALIZADEH; SHARIATI; BESHARATI, 2017)
Zr-MOFs carregados em espuma de poliuretano por polidopamina	Cristal violeta (CV) e rodamina B (RB)	Zr-MOFs carregados em espuma de poliuretano por polidopamina para melhor adsorção de corante	(ZHAO <i>et al.</i> , 2021)
Argila modificada	Eriocromo black-T	Análise comparativa de RSM, ANN e ANFIS e a modelagem mecanicista na adsorção do corante eriocromo black-T usando argila modificada	(ONU <i>et al.</i> , 2021)
Quitosana Magnetizada por Nanopartículas de Fe ₂ O ₃	Corante Ácido Azul 113	Capacidade e Modelagem da Adsorção de Corante Ácido Azul 113 em Quitosana Magnetizada por Nanopartículas de Fe ₂ O ₃	(AL-MUSAWI <i>et al.</i> , 2021)

FONTE: Autora (2022).

Especificamente os corantes dispersos e reativos estudados nesse trabalho, apresenta diversos adsorventes já apresentados na literatura, como apresenta a Tabela 3.

TABELA 3: Adsorventes utilizados na remoção de corantes dispersos e reativos

Adsorvente	Adsorvato	Objetivo do estudo	Referência
Nanopartículas de alumina	Amarelo reativo 160	Remoção do amarelo reativo 160 de solução aquosa por nanopartículas de alumina derivadas de resíduos de alumínio	(GHAFAR <i>et.al</i> , 2020)
Cinzas residuais	Amarelo disperso 3 e Azul brilhante reativo	Remoção simultânea de corantes dispersos e reativos por cinzas pesadas derivadas de resíduos hospitalares incinerados	(BENNEKROUF; OUADJENIA; MAROUF, 2023)
Zeolítico Imidazolato-67, modificado por Nanopartículas de Fe ₃ O ₄	Amarelo reativo 105	Remoção do corante têxtil Amarelo Reativo 105 de águas residuais utilizando Imidazolato-67 Zeolítico modificado por nanopartículas de Fe ₃ O ₄	(POURNAMDARI, <i>et.al</i> , 2023).
Carvão ativado com palha <i>Teff</i>	Amarelo reativo 145	Remoção adsortiva de corante amarelo reativo 145 de efluentes da indústria têxtil usando carvão ativado com palha <i>Teff</i>	(KIFETEW <i>et al.</i> , 2023)
Complexo organometálico	Amarelo reativo 145	Adsorção aprimorada do Yellow 145 reativo no novo complexo baseado em cinzas de pirrotita (Catequina-PG-Fe)	(HATIMI <i>et.al</i> , 2023).
Nanocopolímero	Amarelo reativo 145	Remoção do corante amarelo reativo 145 de águas residuais usando uma superfície nano	(SHAKER; SALMAN; AL-BAIATI, 2023)
Cepa bacteriana <i>B. acillus subtilis</i>	Amarelo disperso 211	Descoloração de Disperse Yellow 211 por <i>Bacillus subtilis</i>	(SHARMA; SINGH; DILBAGHI, 2009)
Gliricidia sepium e Gliricida sepium celulose	Amarelo Disperso 211	Remoção do corante amarelo disperso de soluções aquosas	(OLUWASOLA <i>et.al</i> , 2018)

FONTE: Autora (2023).

2.3.1.1 Carvão ativado

Carvões ativados são materiais carbonáceos de alta porosidade com um conjunto exclusivo de propriedades, tais como: estrutura microporosa bem

desenvolvida, alta área específica, elevado grau de reatividade superficial e capacidade de adsorção, que os tornam materiais adsorventes efetivos e versáteis. Devido a isso, os carvões ativados são um dos materiais adsorventes mais utilizados em processos de adsorção para remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos (KUANG; ZHANG; ZHOU, 2020).

No entanto, o carvão ativado comum não é amplamente utilizado para adsorver e remover poluentes devido à sua baixa capacidade de adsorção, que é causada por pequena área específica e baixo desempenho de seleção de adsorção, além de limitações dos grupos funcionais de superfície e propriedades eletroquímicas. (KUANG; ZHANG; ZHOU, 2020). Devido às limitações desses materiais, como alto custo, lentidão e menor eficiência de adsorção, houve um aumento da demanda por adsorventes de baixo custo com alta eficiência de remoção (VELUSAMY *et al.*, 2021).

Vários adsorventes alternativos de baixo custo, obtidos a partir de resíduos sólidos agrícolas, resíduos sólidos industriais, subprodutos agrícolas e biomassa são usados como adsorventes para o tratamento de adsorção de águas residuais de corantes, conforme é apresentado a Tabela 4, diferente do carvão ativado, obtido a partir do pó de filtro de fiação analisado nesse trabalho, que não foi encontrado estudos na literatura utilizados para o processo de adsorção em corantes têxteis.

TABELA 4: CA utilizados para tratamentos de efluentes têxteis

Material precursor do CA	Adsorvato	Objetivo do estudo	Referência
Carvão ativado de caroços de cereja	Amarelo disperso 211	Adsorção de amarelo disperso 211 em carvão ativado de caroços de cereja	(ERDOGAN; ERDOGAN, 2015)
Carvão ativado mesoporoso de lodo de esgoto de lavanderia industrial	Corante reativo Remazol Brilliant Blue R	Carvão ativado mesoporoso de lodo de esgoto de lavanderia industrial: estudos de adsorção de corante reativo Remazol Brilliant Blue R	(SILVA <i>et al.</i> , 2016)
Carvão ativado mesoporoso sintetizadas a partir de resíduos de tecido denim	Corante reativo Remazol Brilliant Blue R	Fibras de carvão ativado mesoporoso sintetizadas a partir de resíduos de tecido denim: adsorventes eficientes para remoção de corante têxtil de soluções aquosas	(SILVA <i>et al.</i> , 2018)
Carvão ativado à base de biomassa	Corantes aniônicos e catiônicos	A remoção de corantes aniônicos e catiônicos de uma solução aquosa usando carvão ativado à base de biomassa	(NIZAM <i>et al.</i> , 2021)
Carvão ativado produzido a partir de tecido rayon	22 corantes classes químicas azo e triarilmetano (TAM)	Adsorção de corantes em ativpanos de carbono: abordagem de mecanismos de adsorção e acoplamento de ACC com ultrafiltração para tratar efluentes coloridos	(MÉTIVIER-PIGNON; FAUR-BRASQUET; CLOIREC, 2003)

FONTE: Autora (2022).

A capacidade de adsorção do carvão ativado é afetada por muitos fatores, como tipo de material precursor, condições de carbonização, condições de ativação, métodos de pré-tratamento e outros (WANG *et al.*, 2021). A capacidade de adsorção é um índice importante para avaliar o efeito de adsorção do adsorvente (KUANG; ZHANG; ZHOU, 2020).

O mecanismo predominante da carbonização de fibras celulósicas pode ser compreendido em quatro estágios principais: eliminação da água absorvida entre 25°C e 150°C; desidratação intramolecular entre 150°C e 240°C; degradação térmica com quebra das ligações C-O e C-C e formação de água (H₂O), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) entre 240°C e 400°C e quebra das unidades de celulose e repolimerização para a produção de uma estrutura grafitica entre 400 a 700°C (TANG; BACON, 1964).

A carbonização é o processo de aquecimento de matérias-primas em gás inerte para escapar de substâncias voláteis de canais moleculares na matriz de materiais contendo carbono, formando poros e aumentando a área de superfície específica. Os métodos de ativação incluem método químico, método físico e método físico-químico (WANG *et al.*, 2021). Diferentes tipos de agentes ativadores reagem com celulose, hemicelulose, lignina ou polissacarídeo no precursor de carbono, levando a vários mecanismos de ativação (GAO *et al.*, 2020).

Dessas técnicas, a ativação química é considerada o método mais promissor para a produção de CA, as vantagens da ativação química são o baixo custo energético, uma vez que a ativação química geralmente ocorre a uma temperatura inferior à utilizada na ativação física, e ao excelente desempenho, em que os rendimentos da ativação química são superiores aos físicos. A ativação química também tem melhor desenvolvimento de uma estrutura porosa (PRAHAS *et al.*, 2008).

Os agentes ativadores desempenham papéis decisivos na formação de poros ou grupos químicos de superfície durante a ativação. O ácido fosfórico (H₃PO₄) e o cloreto de zinco (ZnCl₂) são usados para a ativação de materiais lignocelulósicos, que não foram previamente carbonizados. Quando comparado ao ZnCl₂, o H₃PO₄ é preferido, devido às desvantagens ambientais, problema de corrosão e recuperação química ineficientes associadas ao ZnCl₂. Embora o hidróxido de potássio (KOH) desenvolva grande micro porosidade, o rendimento do carvão ativado impregnado pelo KOH é menor do que aqueles ativados com ZnCl₂ ou H₃PO₄ e em alta temperatura, ou seja, >±650°C, o teor de carbono é menor do que o carbono fixo no precursor inicial. A presença de potássio metálico irá se intercalar à matriz de carbono, resultando em um menor rendimento de carvão ativado (PRAHAS *et al.*, 2008).

A temperatura de ativação, o tempo de ativação, a temperatura de carbonização e a taxa de impregnação são os principais fatores que afetam a área específica do CA (WANG *et al.*, 2021). A etapa de ativação é desejada para melhorar as características do CA (MEDHAT *et al.*, 2021).

Antes da ativação, a mistura do precursor de carbono e do agente ativador é crítica para as etapas subsequentes, que podem ser chamadas coletivamente de etapa de transferência de massa. O precursor de carbono é normalmente misturado com o agente de ativação por mistura de solução na fase aquosa (modo úmido), ou misturado diretamente com o agente ativador via moagem na fase sólida (método seco). Se o tempo de mistura for muito curto, os agentes ativadores só atingem a camada rasa do precursor de carbono, levando à fraqueza da ativação/reação e desperdício desnecessário do agente ativador (GAO *et al.*, 2020).

A caracterização de materiais é um meio importante para analisar as propriedades dos materiais. A caracterização física (estrutura dos poros e propriedades da superfície), são importantes para a função do carvão ativado. O volume total de poros é um importante indicador para a remoção de poluentes na água, e um grande volume total de poros é benéfico para a remoção de poluentes na água. (WANG *et al.*, 2021). Uma vez que os componentes adsorvidos, concentram-se sobre a superfície externa, quanto maior for esta superfície externa por unidade de massa sólida, mais favorável será a adsorção (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

O material precursor pó de filtro, foi obtido em uma indústria de fios instalada na cidade de Maringá – Paraná, para a produção de carvão ativado.

O efluente sintético foi preparado a partir dos corantes *C.I. Disperse Yellow 211* e *C.I. Reactive Yellow 160* da marca *Golden Technology*, os mesmos são apresentados na Figura 9, respectivamente.

FIGURA 9: *C.I. Disperse Yellow 211* e *C.I. Reactive Yellow 160*



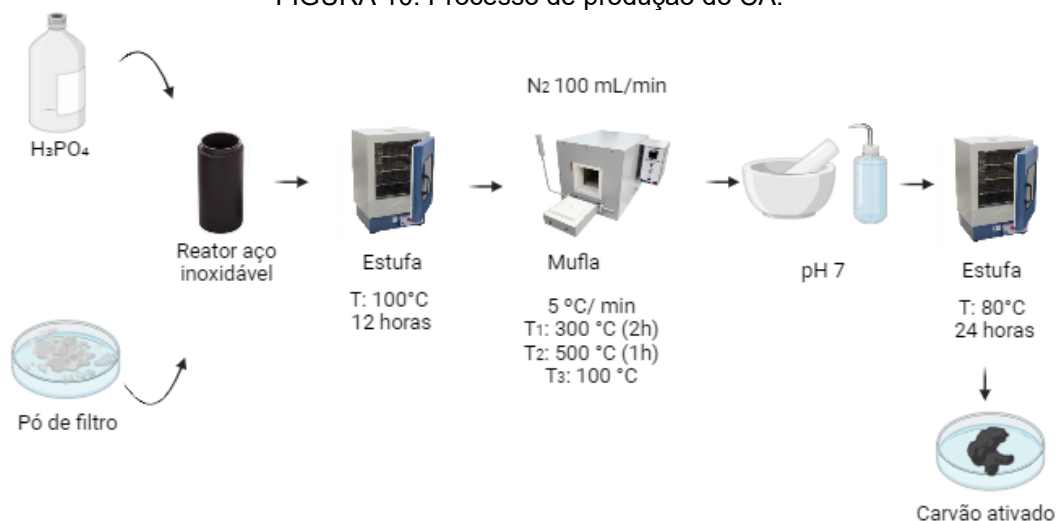
FONTE: Autora (2023).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Síntese do carvão ativado

O processo de produção do CA foi realizado a partir da ativação e carbonização do material precursor, conforme apresentado na Figura 10.

FIGURA 10: Processo de produção do CA.



FONTE: Autora (2022).

3.2.1.1 Preparação do precursor

A metodologia realizada nesse trabalho foi adaptada de Silva *et.al*, (2018), no qual o processo de carbonização iniciou-se com a impregnação do material precursor com o agente de ativação química ácido fosfórico (H_3PO_4) 85%. O processo de impregnação, consistiu em misturar o agente ativador com o pó de filtro, para isso, foi adicionado 3 mL de solução de H_3PO_4 em 3 g de pó de filtro e a síntese foi realizada em um reator de aço inoxidável e tampa removível com orifícios para a entrada de gás. Este foi levado a estufa a $100^\circ C$ pelo período de 12 h, agindo no material precursor através do calor e pressão gerados, obtendo um material impregnado com ácido.

3.2.1.2 Ativação e carbonização (pirólise)

O material impregnado no reator de aço inoxidável foi aquecido em forno mufla (Zezimaq), para submeter esta mistura a um tratamento térmico de ativação sob fluxo constante de gás Nitrogênio (N_2) de 100 mL/min, ao processo de pirólise lenta, aplicando um programa de temperatura de três estágios. Inicialmente, o material foi aquecido a uma taxa de aquecimento $5^\circ C/min$, da temperatura ambiente a um patamar intermediário de $300^\circ C$ por 120 min, objetivando a desidratação da mistura, em seguida, a temperatura foi aumentada para $500^\circ C$ por 1h. Após a etapa de ativação, o sistema foi resfriado até a temperatura de $100^\circ C$.

O CA foi macerado e lavado. Uma primeira lavagem foi realizada com NaOH e as demais com H_2O até a obtenção do pH 7 e depois seco na estufa à $80^\circ C$ por 24 horas. Após esse tempo, foi levado ao dissecador, obtendo-se o CA.

3.2.2 Análise gravimétrica

Os rendimentos dos materiais foram calculados a partir de análise gravimétrica, considerando o peso inicial do precursor e o peso final após o processo de lavagem de acordo com a Equação 1.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{Massa final (g)}}{\text{Massa inicial (g)}} \cdot 100 \quad \text{Equação. 1}$$

3.2.3 Propriedades texturais e morfológicas do CA

3.2.3.1 Análise centesimal

A análise centesimal de uma amostra tem por objetivo determinar o seu teor de carbono fixo (C_{fixo}), ou seja, aquele que não é eliminado por aquecimento na ausência de oxigênio. Para isso, os teores de umidade (U), voláteis (V) e cinzas (C) foram determinados com métodos gravimétricos baseados nos padrões publicados pela *American Society for Testing and Materials (ASTM) D1762 – 84 Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. Os aquecimentos foram realizados em mufla ou estufa, de acordo com procedimento.

As análises químicas de umidade foram determinadas como a perda de peso em um forno de secagem a 105°C. A matéria volátil foi determinada como perda de peso a 950°C sob condições especificadas. A cinza foi determinada como o resíduo após a queima até peso constante a 750°C.

Para a análise de umidade foi aquecida a mufla a 750°C e colocado cadinhos de porcelana previamente aquecido e tampados no forno por 10 min. Resfriou-se os cadinhos em um dessecador durante 1h. Pesou-se os cadinhos e foi adicionado a cada um aproximadamente $1g \pm 0,1g$, da amostra triturada. As amostras foram colocadas no forno a 105°C por 2h e levadas a um dessecador por 1h e após esse tempo, pesadas. Calculou-se a porcentagem de umidade na amostra de acordo com a Equação 3.

$$U (\%) = [(A - B)/A] \times 100 \quad \text{Equação. 2}$$

Em que:

A = gramas de amostra seca ao ar usada e

B = gramas de amostra após secagem a 105°C

O material volátil foi analisado pelo seguinte procedimento: a mufla foi aquecida a 950°C. Os cadinhos utilizados para a determinação da umidade foram pré-aquecidos, com as tampas colocadas e contendo a amostra, da seguinte forma: com a porta do forno aberta, por 2 min na borda externa do forno (300°C) e depois por 3 min na borda do forno (500°C). Em seguida, moveu-se as amostras para a

parte traseira do forno por 6 min com a porta da mufla fechada. Observou-se as amostras através de um pequeno orifício na porta da mufla. Resfriou-se as amostras em um dessecador por 1 hora e pesou-se. Calculou-se a porcentagem de matéria volátil conforme a Equação 4:

$$V (\%) = [(B - C)/B] \times 100 \quad \text{Equação. 3}$$

Em que:

B = gramas de amostra após secagem a 105°C

C = gramas de amostra após secagem a 950°C

O teor de cinzas foi analisado colocando as tampas e o cadinho descoberto utilizado para a determinação de matéria volátil, contendo a amostra na mufla a 750°C por 6 h. Resfriou-se os cadinhos com as tampas em dessecador por 1 hora e pesou-se. Repetiu a queima da amostra até que um período sucessivo de 1 hora de aquecimento resulta-se em uma perda menor que 0,0005 g. Calculou-se a porcentagem de cinzas, conforme a Equação 4.

$$C (\%) = (D/B) \times 100 \quad \text{Equação. 4}$$

Em que:

B = gramas de amostra após secagem a 105°C

D = gramas de resíduo

O teor de carbono fixo foi calculado a partir das análises citadas anteriormente, calculou-se a porcentagem de carbono fixo na amostra de acordo com a Equação 5.

$$C_{\text{fixo}} (\%) = 100 - U - V - C \quad \text{Equação. 5}$$

Em que:

U = porcentagem de umidade

V = porcentagem de matéria volátil

C = porcentagem de cinzas

3.2.3.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise MEV foi realizada no material precursor e no CA na forma de investigar suas morfologias, usando o microscópio eletrônico Shimadzu, modelo SS 550 do Laboratório de Agroquímica e Meio Ambiente da Universidade Estadual de Maringá, campus Maringá.

3.2.3.2 Adsorção/Dessorção de N₂

A análise superficial BET (S_{BET}), volume total de poro (V_T), volume de microporo (V_{micro}), volume do mesoporo (V_{meso}) e o diâmetro de poro (D_P) foram determinados a partir de isotermas de adsorção e dessorção de N₂ em 77 K, usando um Quantachrome, modelo Novatouch LX2, no Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Apucarana (LAMAP). O volume de mesoporo (V_{meso}) foi calculado conforme a Equação 6.

$$V_{meso} = V_T - V_{micro} \quad \text{Equação. 6}$$

Em que:

V_T = volume total de poro

V_{micro} = volume de microporo

O cálculo de D_P foi realizado conforme a Equação 7.

$$D_P = 4V_T / S_{BET} \quad \text{Equação. 7}$$

Em que:

V_T = volume total de poro

S_{BET} = análise superficial BET

3.2.3.3 Análise termogravimétrica (TGA)

As propriedades térmicas do pó de filtro e do CA, foram examinadas a partir de análises TG, usando analisador termogravimétrico TGA – 50, Shimadzu, com gás Argônio (Ar) nas temperaturas de 10 a 800°C, com uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, no Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Apucarana (LAMAP).

3.2.3.4 Espectroscopia no infravermelho com transformada de fourier (FTIR)

Para a investigação dos grupos funcionais, utilizou-se da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier. O equipamento empregado nesta análise foi FTIR (Bruker Vertex 70v spectromete), com resolução de 1 cm^{-1} e 64 acumulações, e a técnica selecionada foi de refletância total atenuada (ATR) na faixa do infravermelho médio compreendida entre 650 e 4.000 cm^{-1} . Foram realizadas caracterizações no material precursor do CA e no CA obtido no Laboratório da Universidade Estadual de Maringá, campus Goioerê.

3.2.3.5 Potencial de carga zero (PCZ)

O valor de pH_{PCZ} foi analisado no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa da Universidade Estadual de Maringá, campus Maringá (COMCAP), sendo determinado de acordo com metodologia descrita por Prahaz *et al.*, (2008). Soluções de cloreto de sódio (NaCl) ($0,10\text{ mol L}^{-1}$) foram preparadas em valores de pH variando de 2,0 a 10,0, usando soluções aquosas de ácido clorídrico (HCl) ($0,10\text{ mol L}^{-1}$) e NaOH ($0,10\text{ mol L}^{-1}$), sendo colocadas 25 mL de cada solução em contato com 0,100 g de CA em béqueres, os quais foram agitados por 24 h. O pH das soluções após agitação foi medido e os gráficos de ΔpH ($\text{pH}_{\text{final}} - \text{pH}_{\text{inicial}}$) versus $\text{pH}_{\text{inicial}}$ foram plotados. O pH_{PCZ} é atribuído ao ponto no qual o $\Delta\text{pH} = 0$.

3.2.4 Processo de adsorção

3.2.4.1 Análise espectrofotometria uv-visível

Para esta análise, soluções dos corantes amarelo disperso e amarelo reativo, de concentração de 1000 ppm, tiveram suas curvas de absorbância identificadas na faixa de comprimento de onda $400\text{ cm}^{-1} \leq \lambda \leq 800\text{ cm}^{-1}$ em Espectrofotômetro de absorção UV-Vis (Cary 60, Agilent), no Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Apucarana (LAMAP). Feito isso, foram preparadas soluções de 4, 6, 8, 10, 12, 15,18 e 20 ppm dos corantes amarelo disperso e amarelo reativo e uma terceira solução, contendo os dois tipos de corantes que geralmente ocorre nas estações de tratamento de efluentes têxteis,

para obtenção das curvas de calibração no comprimento de onda correspondente ao pico de absorvância no visível.

3.2.4.2 pH

O efeito do pH foi avaliado usando 20 mL das soluções de corante disperso e reativo com concentrações iniciais de 60 mg.L⁻¹ e pH 4, 6 e 10, utilizando HCl e NaOH, o mesmo processo foi realizado para uma terceira solução contendo 10 mL da solução de corante disperso e 10 mL da solução de corante reativo. Foram adicionado 20 mg do CA nas soluções e agitadas por 4 h em uma Incubadora Shaker SL-222, com rotação de 150 rpm e temperatura 25°C. Em seguida, soluções foram filtradas e as concentrações remanescentes dos corantes foram determinadas usando um espectrofotômetro UV-Vis (Cary 60, Agilent), nos seus respectivos comprimentos de onda, usando curva analítica. A quantidade máxima adsorvida (q_m) foi calculada pela Equação 8:

$$q_m = [(C_0 - C_f) V] / m \quad \text{Equação. 8}$$

Em que C_0 e C_f são as concentrações inicial e final dos corantes (mg L⁻¹), respectivamente, V é o volume da solução (L) e m é a massa do CA (g).

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE GRAVIMÉTRICA

O processo de pirólise (carbonização e ativação) do material precursor pó de filtro apresentou rendimento $52,72 \pm 0,125\%$. Essa perda de massa consiste na remoção de açúcares, graxas e outros materiais presentes na superfície da fibra de CO e ainda parte do micropó (material inorgânico) presente no material (LOURENÇO; SILVA, 2018).

A Tabela 5, apresenta o rendimento de produções de CA a partir de resíduos de algodão, que realizaram a ativação química do pó de filtro com H_3PO_4 , reportados em outras literaturas.

TABELA 5: Rendimento das produções de CAs reportados em outras literaturas

Material precursor	Rendimento	Autor
Resíduos de tecido de algodão	43,63%	(NARITA, 2022)
Resíduo de fibra de algodão	$60,145 \pm 1,912\%$	(COSTA, 2020)
Tecido de algodão	26,53%	(SALEHI; DADASHIAN; ABEDI, 2017)
Resíduos denim 100% algodão	53%	(SILVA <i>et.al</i> , 2018)
Resíduo de pó de filtro	$52,72\% \pm 0,125$	Esse trabalho

FONTE: Autora (2023).

O processo de formação da estrutura porosa através da interação do material precursor com o H_3PO_4 , contribuiu para uma melhor estrutura porosa em maior concentração para os precursores pré-carbonizados como no presente estudo. A redução no rendimento se deve principalmente pela reação entre a estrutura orgânica do carbono e o H_3PO_4 , incluindo desidratação, degradação e condensação com liberação de gases. Por outro lado, a reação do H_3PO_4 com grupos funcionais apropriados, resulta na formação de compostos de fósforo irreversíveis, além de ésteres de fosfato e polifosfato produzidos pela reação de desidratação, contribuindo para o aumento do rendimento. Ambas reduções na extensão das reações acima mencionadas, contribuíram para um aumento marginal no rendimento (DUAN *et al*, 2017).

4.2 ANÁLISE CENTESIMAL

A análise centesimal do CA revelou que ele possui 8,3% de umidade, 8,9% de cinzas, 81,45% de materiais voláteis e 1,29% de carbono fixo. A Tabela 6, apresenta a análise centesimal de CAs produzidos a partir de resíduos de algodão, que foram ativados quimicamente com H_3PO_4 , reportados em outras literaturas.

TABELA 6: Análise centesimal de CAs reportados em outras literaturas

Umidade (%)	Teor de cinzas (%)	Materiais voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Autor
6,055	0,415	90,55	90,55	(COSTA, 2020)
5,93	0,83	90,8	2,43	(SILVA <i>et.al</i> , 2018)
8,3	8,9	81,45	1,29	Esse trabalho

FONTE: Autora (2023).

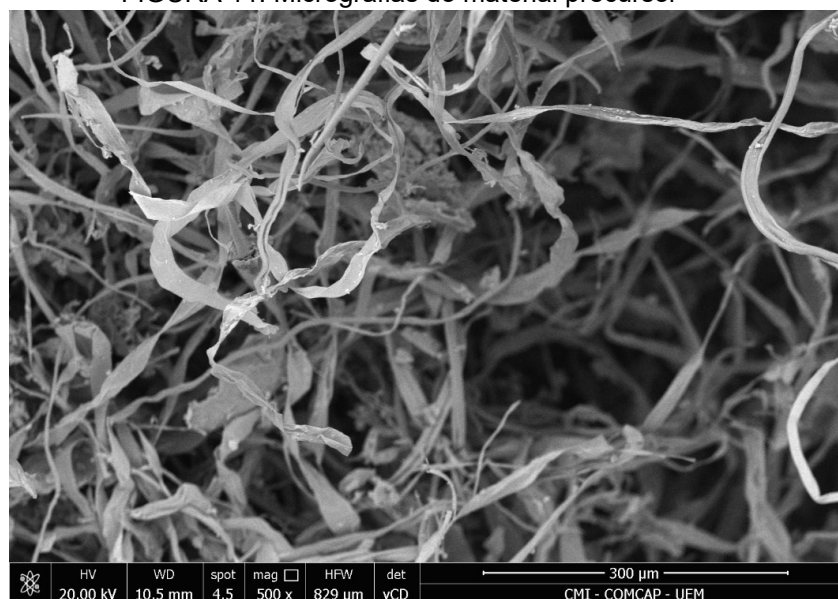
O conteúdo de carbono fixo presente no material é essencialmente devido a presença de celulose das fibras do algodão. Durante o procedimento de síntese do CA, acredita-se que o H_3PO_4 reage com a celulose, formando ligações éster com seus grupos -OH em temperaturas abaixo de 200°C, ajudando a reticular as cadeias poliméricas. O ácido estabiliza a estrutura da celulose, inibindo a formação de composto volátil, que oferece uma rota para sua degradação por decomposição em produtos voláteis (SILVA *et.al*, 2018).

Os materiais voláteis do carvão são os materiais liberados em alta temperatura e na ausência de ar (atmosfera inerte). É uma mistura de hidrocarbonetos de longas e curtas cadeias e hidrocarbonetos de enxofre. As cinzas correspondem ao teor de material inorgânico presente no material, que pode ser comprovada analisando o gráfico de TGA do pó de filtro.

4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As propriedades morfológicas do resíduo de pó de filtro (Figura 11) e do CA (Figura 12) foram analisadas por MEV.

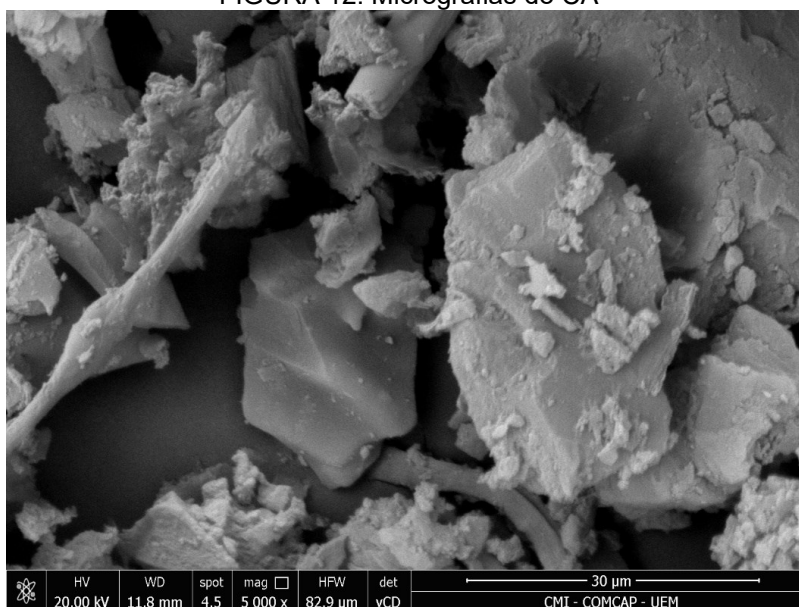
FIGURA 11: Micrografias do material precursor



FONTE: Autora (2023).

A Figura 11 mostra que o material precursor pó de filtro, possui muitas fibras de algodão, fibras entrelaçadas e alongadas com espaçamentos uniformes, apresentando uma superfície lisa e ausente de poros e com estrutura ordenada e compacta.

FIGURA 12: Micrografias do CA



FONTE: Autora (2023).

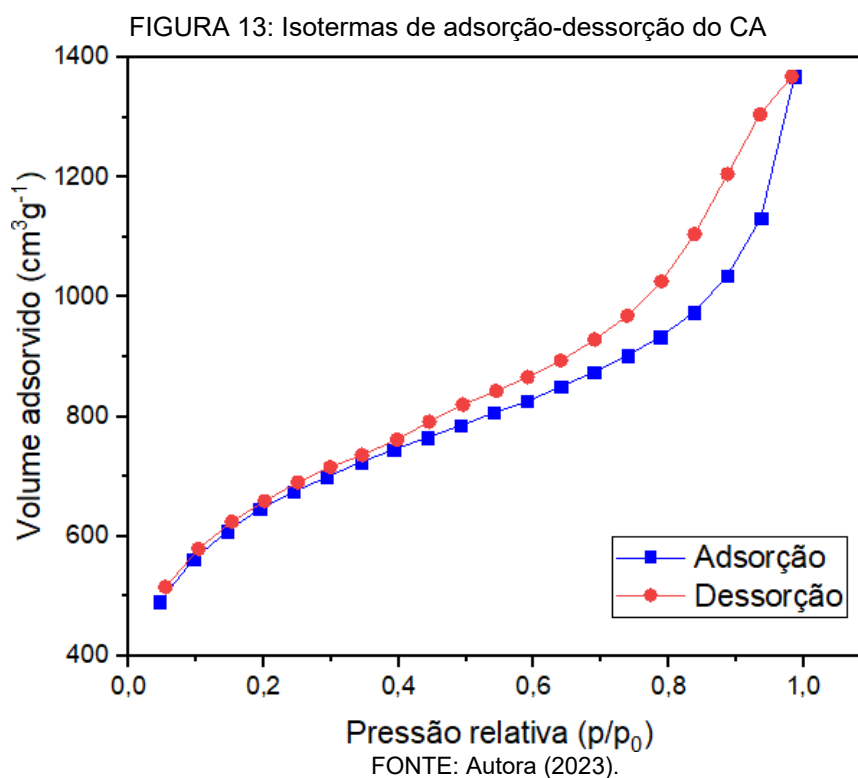
A Figura 12 apresenta que o CA possui superfície irregular, constituindo aglomerados de partículas com morfologia irregular e poros visíveis e, conforme esperado, apresentou partículas mais alongadas em virtude da natureza fibrosa do material precursor (NARITA, 2022; COSTA, 2020; ZHENG *et al*, 2014). Algumas

fendas irregulares e descontínuas podem ser observadas, e que podem contribuir para o aumento da capacidade de adsorção do CA (DUAN *et al.*, 2017). Pode-se observar que alguns fragmentos foram depositados sobre a superfície do CA, o que pode ser atribuído à óxidos de fósforos e fosfatados de metais insolúveis que foram formados durante o processo de carbonização (SILVA, 2017, NARITA, 2022; COSTA, 2020; ZHENG *et al.*, 2014).

4.4 ADSORÇÃO/DESSORÇÃO DE N₂

A partir da análise de adsorção de gases é possível determinar o tamanho de poros e a área específica do CA. A maioria dos materiais utilizados na literatura para trabalhos em meio líquido são macro ou mesoporosos, em que a seletividade está mais relacionada às interações com os grupos superficiais e não com o tamanho de poro (NASCIMENTO, 2014).

A estrutura de poros e a área específica do material adsorvente, foi obtida pela construção de uma isoterma de adsorção-dessorção de N₂. A Figura 13, apresenta as análises realizadas no CA.



A partir dos resultados pode ser visto que com o aumento da pressão relativa, ocorre um rápido aumento no volume de N₂ adsorvido, enquanto a diminuição na pressão relativa, promove a dessorção de N₂ (SILVA, 2017). De acordo com a classificação da IUPAC, a isoterma obtida pode ser classificada como do tipo IV, típicas de matérias mesoporoso, e com histerese (sobreposição das curvas de adsorção e dessorção) do tipo H4, que está associada com a condensação capilar que ocorre nos mesoporos, associado a poros estreitos, semelhantes a fendas e a captação limitante em uma faixa de alta pressão relativa (nesse caso de 0,4 a 1,0). A parte inicial da isoterma do tipo IV é atribuída a monocamada-multicamada, o início da seção média quase linear da isoterma, é muitas vezes usado para indicar o estágio em que a cobertura monocamada está completa e a adsorção multicamada está prestes a começar (SING, 1982).

Com base na análise de BET, área específica de BET (S_{BET}), volume total de poros (V_T), volume de microporos (V_{MICRO}) e volume de mesoporos (V_{MESO}) do CA produzido foram determinados como 2146,719m²/g, 2,12cm³/g, 0,59cm³/g, 1,53cm³/g, respectivamente. Os valores de área de superfície e volume de poros obtidos indicam que o carvão ativado produzido possui estrutura porosa bem desenvolvida, na qual 72% do volume de poros deriva dos mesoporos. Sendo os mesoporos, necessários para fornecer canais de transporte para adsorção de adsorvato, indispensáveis para boas taxas de adsorção de moléculas grandes, tais como corantes orgânicos (COSTA, 2020; EKRAMI *et al*, 2015).

Os resultados obtidos neste estudo se mostraram promissores quando comparados com valores das propriedades texturais reportados em outras literaturas que caracterizaram o material carbonáceo produzido a partir do material precursor CO e utilizando o H₃PO₄ como agente ativador, esses resultados são apresentados na Tabela 7.

TABELA 7: Propriedades texturais dos CAs reportadas em outras literaturas

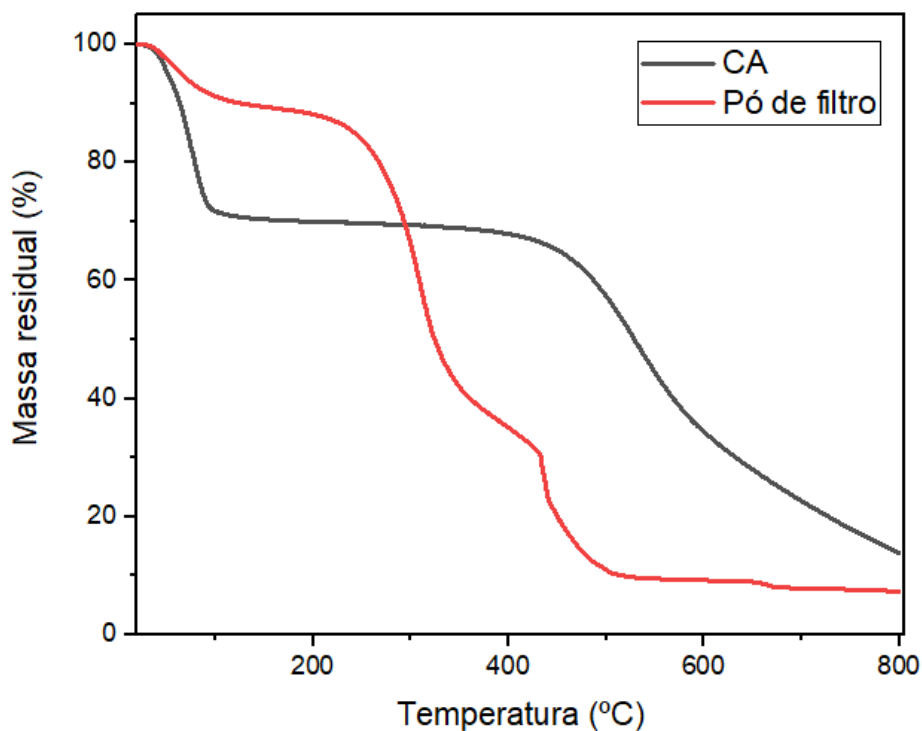
S_{BET} (m^2g^{-1})	V_T (cm^3g^{-1})	V_{micro} (cm^3g^{-1})	V_{meso} (cm^3g^{-1})	D_P (nm)	Autor
1030	0,75	-	-	-	(NARITA, 2022)
1096	0,81	0,19	0,62	1,5	(COSTA, 2020)
691	0,32	-	-	1,8	(SALEHI; DADASHIAN; ABEDI, 2017)
1582	1,01	0,17	0,39	3,6	(SILVA <i>et al.</i> , 2018)
694	-	0,29	0,07	-	(EKRAMI <i>et al.</i> , 2015)
1370	0,98	-	-	2,4	(DUAN <i>et al.</i> , 2017)
789	-	0,22	0,04	1,9	(ZHENG <i>et al.</i> , 2014)
2146	2,12	0,59	1,53	0,0039	Esse trabalho

FONTE: Autora (2023).

4.5 ANÁLISE TGA

A curva TGA do material precursor pó de filtro e do CA é apresentado na Figura 14. Após o primeiro período de perda de massa, correspondente a remoção de umidade (até ~100 °C), o pó de filtro e o CA mostraram comportamentos distintos de perda de massa.

FIGURA 14: Curvas termogravimétricas das amostras do material precursor e CA



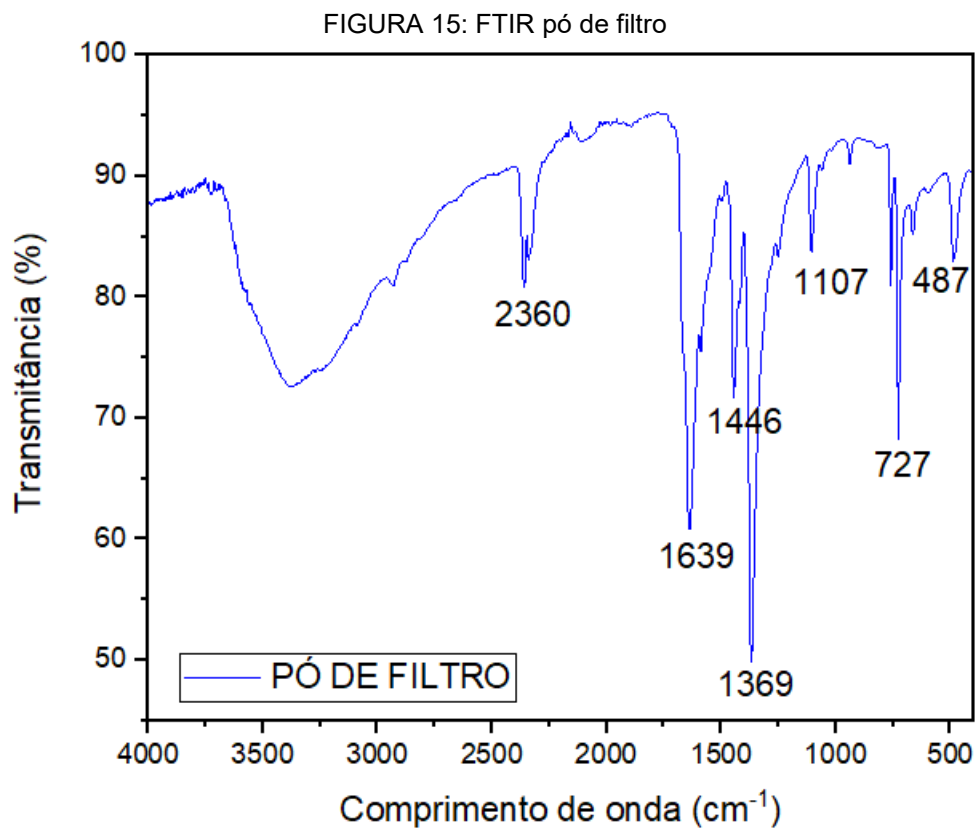
FONTE: Autora (2023).

Para o pó de filtro, uma perda de massa de 10-72% em massa de 295 a 370°C, correspondente a degradação térmica da celulose da fibra de algodão, a qual envolve reações de despolimerização, desidratação e decomposição das unidades glicosídicas, hemicelulose, celulose e lignina.

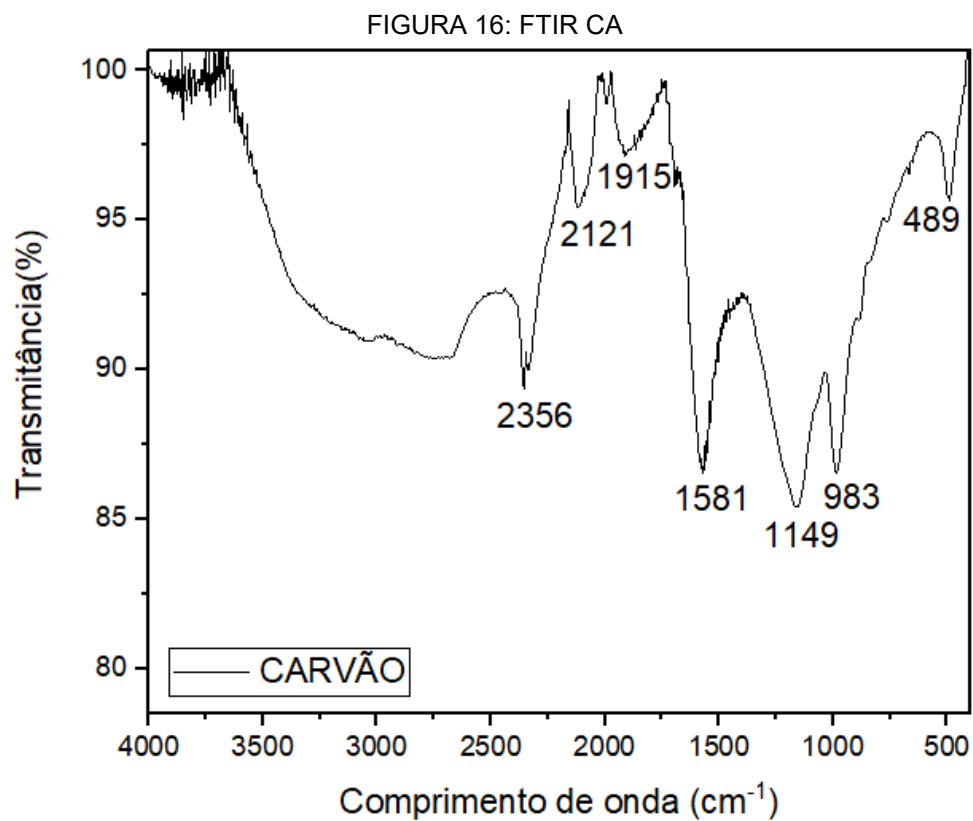
A impregnação de ácido fosfórico na matriz celulósica provoca alterações expressivas no seu comportamento térmico, o CA apresentou uma boa estabilidade térmica, uma perda de massa muito lenta em ~370-550 °C, confirmando que o carvão resultante nessa faixa de temperatura é termicamente mais estável. Frações de maior massa foram alcançadas na faixa de 200-550 °C que se relacionam com a degradação de celulose, hemicelulose e lignina em temperaturas de 295, 345, 375°C, respectivamente. Uma perda de massa de aproximadamente 40% na faixa de temperatura entre 200 a 600°C foi observado, nesse intervalo de temperatura, ocorre uma reação entre o agente ativador e o pó de filtro, para formação de organofosfatos e ao desenvolvimento de poros na estrutura, promovendo formação de ésteres de fosfato a partir dos grupos hidroxila e o desenvolvimento de microporos (até 350°C) e mesoporos (até 500 °C), além de provocar a eliminação do H₃PO₄ e a redução gradativa do volume de poros do material (SALEHI *et.al*, 2017; CARDOSO, 2020; NARITA, 2022; SILVA *et.al*, 2018).

4.6 FTIR

Espectros FTIR de ambas as amostras têm bandas semelhantes, como pode ser visto nas Figuras 15 e 16, respectivamente. O espectro de infravermelho do pó de filtro e do CA mostrou a presença de bandas na região de 2360 a 487cm⁻¹, indicando a presença, de carbonilas, carboxilas, fenóis, ésteres, polissacarídeos e outros. O FTIR foi realizado para caracterizar as alterações da estrutura química da superfície do CA.



FONTE: Autora (2023).



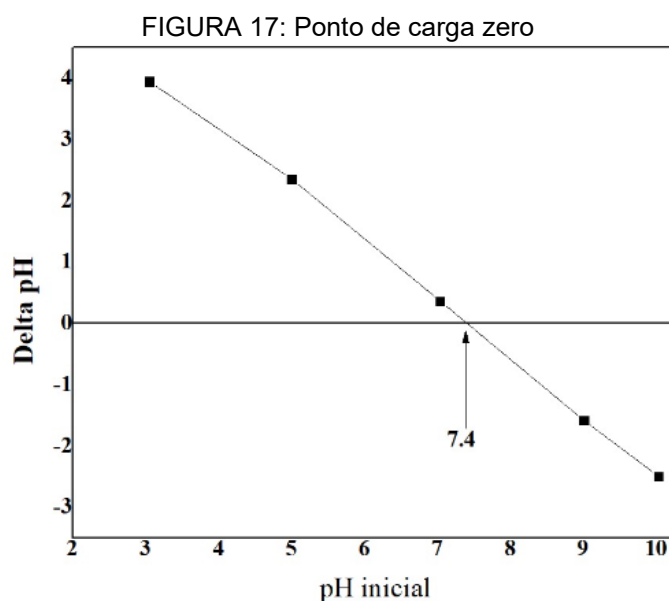
FONTE: Autora (2023).

A Figura 15 mostra o espectro do material precursor, sendo as bandas características da celulose, C-H alongamento (2360 cm^{-1}) e C-H (1446 cm^{-1}) balanço vibracional (deformação angular em plano) do grupo CH (COSTA, 2020; CASTILLO *et al.*, 2016). A banda forte em 1369 cm^{-1} é atribuída à absorção por C-H devido ao alongamento do grupo acetil no hemiceluloses (ZHENG *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2018; COSTA, 2020; CASTILLO *et al.*, 2016). A banda forte em 1639 cm^{-1} é característica da absorção de C=O vibrações em cetonas, aldeídos ou em ácidos carboxílicos (SILVA *et al.*, 2018; COSTA, 2020; CASTILLO *et al.*, 2014). A banda em 1107 cm^{-1} é atribuída ao alongamento C-O em celulose, hemicelulose e lignina ou alongamento C-O-C em celulose e hemicelulose (ZHENG *et al.*, 2014; COSTA, 2020). A desidratação foi sustentado pelo desaparecimento precoce do estiramento C-O-C (1107 cm^{-1}) e alongamento C-O (983 cm^{-1}). (As bandas localizadas em 2360 , 1639 e 1446 - 1369 cm^{-1} que estão relacionados com água e grupos orgânicos diminuíram consideravelmente, o que pode ser explicado tendo em vista a decomposição das cadeias de celulose por desidratação, descarbonização, abertura de anéis, quebra de ligações glicosídicas, aromatização e descarboxilação (CASTILLO *et al.*, 2016).

Na Figura 16, o espectro do CA mostraram algumas mudanças devido ao processo de pirólise apresentando a formação de novas bandas e desaparecimento de outras. As bandas que desapareceram estão relacionadas à celulose e estruturas de lignina, uma vez que a ativação com H_3PO_4 resultou na decomposição destes compostos orgânicos (YANG *et al.*, 2011). A banda em 1915 cm^{-1} , foram atribuídos a C=O vibração de alongamento de grupos acetil na estrutura da hemicelulose (BELTRAME *et al.*, 2018). A mudança do alongamento C=C banda em direção a 1581 cm^{-1} , significando conjugação de ligações C=C, ocorreu, correspondente ao alongamento C=C de alcenos que indica a desidratação da celulose (COSTA, 2020). Bandas na faixa de 1149 cm^{-1} , são atribuídos a carbonos oxidados, como vibração de estiramento CO de ácidos carboxílicos, álcoois, fenóis, éteres e/ou ésteres (BELTRAME *et al.*, 2018). Na faixa de vibrações de valência C-O de 983 cm^{-1} (SCHWANNINGER *et al.*, 2004).

4.7 POTENCIAL DE CARGA ZERO (PCZ)

O valor de pH que resulta em carga líquida zero é denominado ponto de carga zero (PCZ), conforme apresenta a Figura 17. O conhecimento do PCZ dos materiais de interesse, torna possível prever o efeito do pH nos fenômenos e processos envolvendo adsorção. Portanto, a determinação do PCZ é um elemento importante da caracterização de adsorventes (KOSMULSKI, 2002).



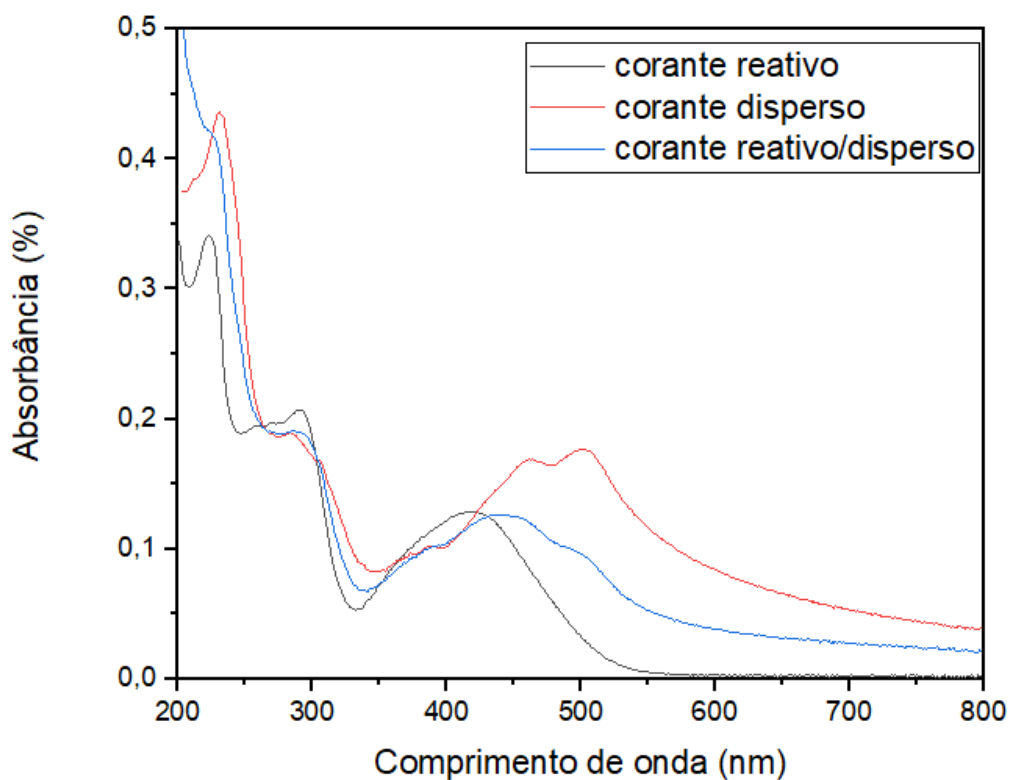
FONTE: Autora (2023).

O pH pode determinar a carga de superfície de um adsorvente, governando as interações eletrostáticas entre o adsorvente e adsorvato (NASCIMENTO, 2014). O pH_{PCZ} resultante foi $\text{pH}_{\text{PCZ}} = 7,4$, portanto, possui características básicas, isso sugeri que a superfície do material é negativamente carregada em soluções com valores de pH maiores do que 7,4 e positivamente carregada para soluções com valores de pH mais baixos do que 7,4.

4.8 TESTE DE ADSORÇÃO

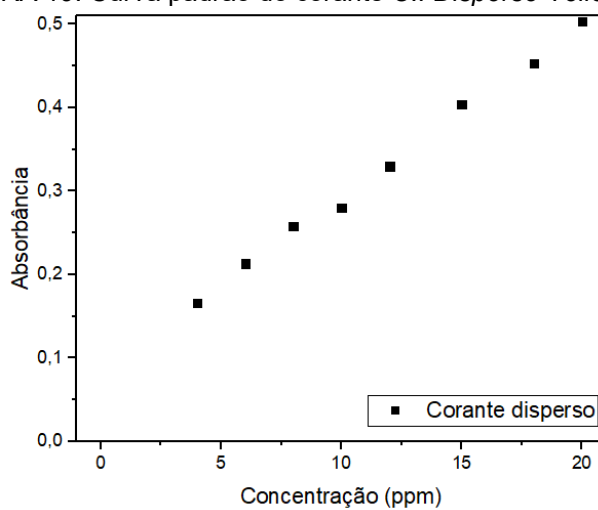
A partir da varredura das soluções dos corantes amarelo disperso 211 e amarelo reativo 160, obteve-se os comprimentos de onda correspondente a $\lambda=498$ nm e $\lambda= 423$ nm, respectivamente, conforme apresentado na Figura 18.

FIGURA 18: Comprimento de onda das soluções de corante

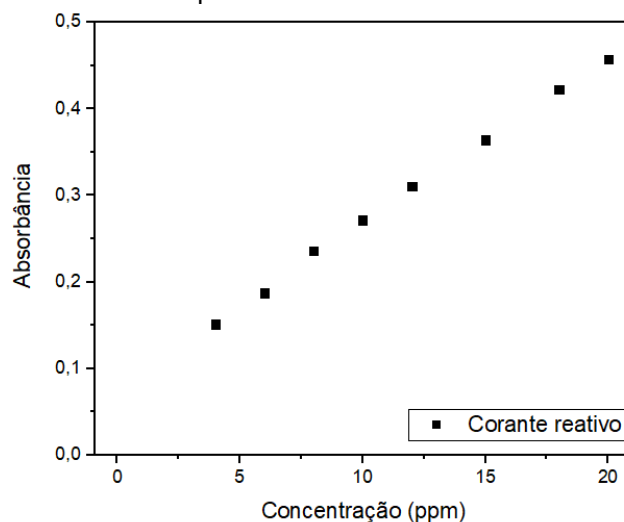


FONTE: Autora (2023).

A Figura 19 mostra as curvas padrão para o corante amarelo disperso neste comprimento de onda e a Figura 20 mostra as curvas padrão para o corante amarelo reativo nesse comprimento de onda.

FIGURA 19: Curva padrão do corante *C.I Disperse Yellow 211*

FONTE: Autora (2023).

FIGURA 20: Curva padrão do corante *C.I Rective Yellow 160*

FONTE: Autora (2023).

A Tabela 8 apresenta os valores dos coeficientes linear e angular obtidos pelo ajuste linear bem como os respectivos valores de coeficiente de correlação.

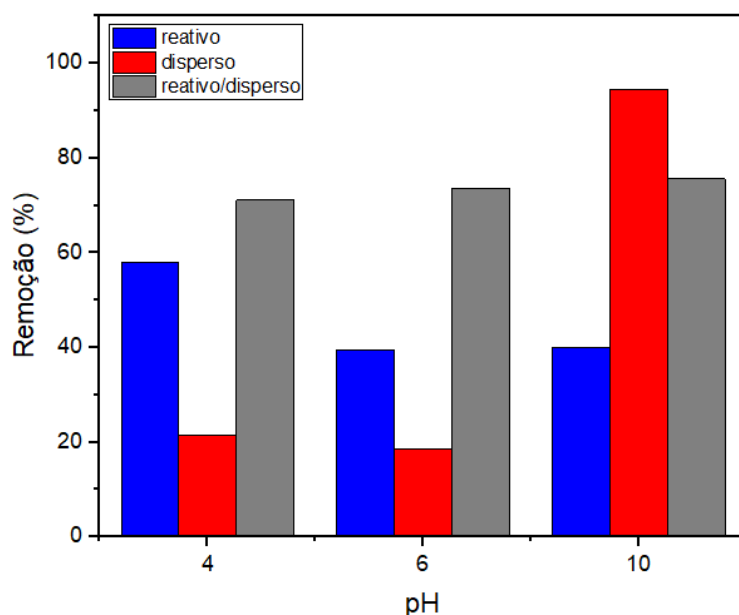
TABELA 8: Valores dos parâmetros obtidos pelo ajuste linear das curvas analíticas experimentais

	a	b	Coefficiente de Correlação (R^2)
Disperso	0,0208	0,0842	0,9966
Reativo	0,0192	0,0775	0,9986

FONTE: Autora (2023).

Os testes de adsorção realizados variando o pH em 4, 6 e 10 para as soluções de corante reativo, corante disperso e ambos os corantes, resultaram em um maior percentual de adsorção em pH 4 para o corante reativo (58%), para o corante disperso o processo de adsorção se mostrou mais eficiente em pH alcalino (pH 10) resultando em uma remoção de 95% do corante e para a solução contendo os dois tipos de corante, o seu percentual de remoção de corante foi maior em pH 10 obtendo uma remoção de 76%, conforme apresenta a Figura 21.

FIGURA 21: Adsorção variando pH



FONTE: Autora (2023).

Esses resultados podem ser comparados com a remoção de corantes reativos e dispersos, utilizando CA como material adsorvente, conforme a Tabela 9, reportados em outras literaturas.

TABELA 9: Remoção de corantes com materiais adsorventes reportados em outras literaturas

Autor	Adsorvente	Adsorvato	% remoção	Tempo
Esse trabalho	Carvão ativado a partir de pó de filtro	Corante reativo amarelo 160	%	4h
		Corante disperso amarelo 211	50%	
		Corantes reativo amarelo 160/disperso amarelo 211	67,51%	
(NARITA, 2022)	Carvão ativado a partir de resíduos de tecido de algodão	Corante reativo Amarelo Ouro Remazol RNL	99%	48h
(COSTA, 2020)	Carvão ativado de resíduo de fibra de algodão	Corante Novacron Vermelho S-B	75,74%	12h
(KIFETEW <i>et.al.</i> , 2023)	Carvão ativado com palha <i>Teff</i>	Corante amarelo reativo 145	98,53%	-
(GHAFAR <i>et.al.</i> , 2020)	Nanopartículas de alumina derivadas de resíduos de alumínio	Corante amarelo reativo 160	100%	10 min
(SHARMA; SINGH; DILBAGHI, 2009)	Cepa bacteriana <i>B acillus subtilis</i>	Corante amarelo disperso 211	80%	-

FONTE: Autora (2023).

O pH do meio influencia fortemente o processo de adsorção (NASCIMENTO, 2014). A influência do pH da solução no processo de adsorção está ligada, principalmente, a um ajuste das interações eletrostáticas adsorbato-adsorvente, uma vez que esse fator regula a carga superficial do adsorvente e também o grau de ionização do adsorbato (HU *et al.*, 2013).

Pode-se observar que o corante reativo apresentou maior adsorção em pH 4, já o corante disperso e a solução contendo os dois corantes em pH 10.

Especificamente, para valores de $\text{pH} < 7,4$ o CA possui carga positiva sobre a superfície, enquanto que o corante reativo possui a existência de uma forte interação eletrostática entre as moléculas do corante reativo que se apresentam cargas negativas em solução devido seus grupos sulfônicos ($-\text{R}-\text{SO}_3^-$) (COSTA, 2020; SILVA, 2017), como pode ser visto na Figura 8. Tal fato está em concordância com as determinações de potencial zeta obtido para o carvão.

Para valores de $\text{pH} > 7,4$ o CA possui carga negativa sobre a superfície e a adsorção do corante disperso e da solução contendo corante reativo e disperso em pH alcalino, apresentou maior eficiência na remoção, isto pode ser explicado por Aksu e Yener (2001) que em pH alcalino a competição de sítios ativos no carvão são minimizada e apresenta adsorção por mecanismo de interações dispersivas/repulsivas (AKSU; YENER, 2001).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que os objetivos do trabalho foram alcançados, produzindo um material carbonáceo com um bom rendimento ($52,72 \pm 0,125\%$) a partir do resíduo de pó de filtro.

O CA produzido apresentou características físico-químicas semelhantes a outros reportados em literatura, consideradas a diferença do material precursor, possuindo uma elevada área específica ($S_{BET} = 2146,72 \text{ m}^2/\text{g}$), volume total de poros ($V_T = 2,12 \text{ cm}^3/\text{g}$), volume de microporos ($V_{MICRO} = 0,59 \text{ cm}^3/\text{g}$), volume de mesoporos ($V_{MESO} = 1,53 \text{ cm}^3/\text{g}$), apresentando características mesoporosas e diâmetro de poro ($D_P = 0,0039 \text{ nm}$).

O desempenho do CA como material adsorvente para a remoção de corantes se mostrou eficiente, apresentando uma remoção de 58% para o corante reativo, 95% para o corante disperso e 76% para a solução contendo os dois corantes. Os estudos de adsorção mostraram que o pH possui uma forte influência na adsorção, onde o corante reativo apresentou melhor resultado em pH 4 e o corante disperso e a solução contendo os dois corantes em pH 10.

Com isso, percebe-se que a utilização de resíduos que possuem um elevado teor de celulose, pode ser utilizado como material precursor para a obtenção de CA, e o mesmo aplicado para a remoção de poluente orgânicos a partir de soluções aquosas.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se uma avaliação do reciclo do carvão a partir de adsorções e dessorções sucessivas.

Estudos de cinética e termodinâmica dos processos de adsorção, examinando o mecanismo controlador do processo de adsorção, determinando o tempo de equilíbrio e a taxa de adsorção.

REFERÊNCIAS

ABDULRAZZAQ, Nada N.; AL-SABBAGH, Baseem H.; SHANSHOOL, Haider A. Coupling of electrocoagulation and microflotation for the removal of textile dyes from aqueous solutions. **Journal Of Water Process Engineering**, Bagdá, v. 40, p. 1-6, abr. 2021.

ABIT. **Perfil do setor**. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 03 maio 2022.

ABRAFAS. **Processos Produtivos**. Disponível em: <https://www.abrafas.org.br/processos-produtivos>. Acesso em: 21 ago. 2023.

ABRAPA. **Algodão no Brasil**. Disponível em: <https://www.abrapa.com.br/Paginas/Dados/Algod%C3%A3o%20no%20Brasil.aspx>. Acesso em: 01 ago. 2023.

ALIZADEH, Nina; SHARIATI, Shahab; BESHARATI, Naereh. Adsorption of crystal violet and methylene blue on azolla and fig leaves modified with magnetite iron oxide nanoparticles. **International Journal of Environmental Research**, v. 11, n. 2, p. 197-206, 2017.

AL-MUSAWI, Tariq J. *et al.* Capacity and Modeling of Acid Blue 113 Dye Adsorption onto Chitosan Magnetized by Fe₂O₃ Nanoparticles. **Journal Of Polymers And The Environment**, Jordan, v. 30, n. 1, p. 344-359, 7 jun. 2021.

AKSU, Zümriye; YENER, Jülide. A comparative adsorption/biosorption study of mono-chlorinated phenols onto various sorbents. **Waste Management**, Turkey, v. 21, n. 8, p. 695-702, jan. 2001.

AKTER, Maeen Md. Khairul *et al.* Textile-apparel manufacturing and material waste management in the circular economy: a conceptual model to achieve sustainable development goal (sdg) 12 for bangladesh. **Cleaner Environmental Systems**, [S.L.], v. 4, p. 1-12, mar. 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762 – 84**: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Eua, 2007. 2 p.

BABU, B. Ramesh. *et al.* Textile technology: Cotton textile processing: waste generation and effluent treatment. **Journal of Cotton Science**, v.11, p. 141–153 2007.

BELTRAME, Karla K. *et al.* Adsorption of caffeine on mesoporous activated carbon fibers prepared from pineapple plant leaves. **Ecotoxicology And Environmental Safety**, Maringá, v. 147, p. 64-71, jan. 2018.

BELTRAME, Leocádia Terezinha Cordeiro. **A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes**. 2000. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, A Indústria Têxtil no Brasil: Uma Revisão dos Seus Impactos Ambientais e Possíveis

Tratamentos Para Os Seus Efluentes, A Indústria Têxtil no Brasil: Uma Revisão dos Seus Impactos Ambientais e Possíveis Tratamentos Para Os Seus Efluentes, 2000.

BENNEKROUF, Fatima Z.; OUADJENIA, Fatima; MAROUF, Reda. Simultaneous removal of disperse and reactive dyes by bottom ash derived from incinerated hospital waste. **Journal Of The Iranian Chemical Society**, [S.L.], v. 20, n. 7, p. 1523-1534, 5 mar. 2023.

BURKINSHAW, Stephen M.. **Physico-chemical Aspects of Textile Coloration**. United Kingdom: Society Of Dyers And Colourists, 2016. 645 p.

CASTILLO, Didilia Ileana Mendoza *et al.* Removal of heavy metals and arsenic from aqueous solution using textile wastes from denim industry. **International Journal Of Environmental Science And Technology**, Mexico, v. 12, n. 5, p. 1657-1668, 9 abr. 2014.

CASTILLO, Didilia Ileana Mendoza *et al.* Synthesis of denim waste-based adsorbents and their application in water defluoridation. **Journal Of Molecular Liquids**, México, v. 221, p. 469-478, set. 2016.

CAZETTA, André L. *et al.* NaOH-activated carbon of high surface area produced from coconut shell: kinetics and equilibrium studies from the methylene blue adsorption. **Chemical Engineering Journal**, Maringá, v. 174, n. 1, p. 117-125, out. 2011.

CHEN, Xuejun *et al.* Advanced treatment of textile wastewater for reuse using electrochemical oxidation and membrane filtration. **Water Sa**, Xangai, v. 31, n. 1, p. 127-132, 7 jul. 2005.

COSTA, João Gabriel Bezerra. **Carvão ativado a partir de resíduo têxtil: síntese, caracterização e aplicação na remoção de corante reativo em efluente sintético**. 2020. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

CSERI, Levente *et al.* Electrospun Adsorptive Nanofibrous Membranes from Ion Exchange Polymers to Snare Textile Dyes from Wastewater. **Advanced Materials Technologies**, Arábia Saudita, v. 6, n. 10, p. 1-9, 27 jan. 2021.

DUAN, Xinhui *et al.* Synthesis of activated carbon fibers from cotton by microwave induced H₃PO₄ activation. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, [S.L.], v. 70, p. 374-381, jan. 2017.

ECONODATA. **Lista de Empresas de Preparação e Fiação de Fibras de Algodão no Brasil**. Disponível em: <https://www.econodata.com.br/empresas/todo-brasil/preparacao-e-fiacao-de-fibras-de-algodao-c-13111>. Acesso em: 01 ago. 2023.

EKRAMI, E. *et al.* Adsorption of methylene blue by waste cotton activated carbon: equilibrium, kinetics, and thermodynamic studies. **Desalination And Water Treatment**, [S.L.], v. 57, n. 15, p. 7098-7108, 16 fev. 2015.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A New Textiles Economy: Redesigning fashion's future**. [S.I.], 2017. 50 p. Disponível em:

<https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>. Acesso em: 24 jul. 2023.

EMBRAPA. **Tecnologia da fibra e do fio do algodão, análises e interpretações dos resultados**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/241160/tecnologia-da-fibra-e-do-fio-do-algodao-analises-e-interpretacoes-dos-resultados>. Acesso em: 16 abr. 2022.

ERDOGAN, Taner; ERDOGAN, Fatma Oguz. Characterization of the Adsorption of Disperse Yellow 211 on Activated Carbon from Cherry Stones Following Microwave-Assisted Phosphoric Acid Treatment. **Analytical Letters**, [S.L.], v. 49, n. 7, p. 917-928, 2 dez. 2015.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Textiles and the environment in a circular economy**. [S.l.]: Eea, 2019. 61 p. Disponível em: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/textiles-and-the-environment-in-a-circular-economy>. Acesso em: 24 jul. 2023.

GAO, Yuan *et al.* Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: a review. **Science Of The Total Environment**, Dalian, v. 746, p. 1-85, dez. 2020.

GHAFFAR, Hany H. Abdel *et al.* Removal of reactive yellow 160 from aqueous solution by alumina nanoparticles derived from aluminium waste residue. **Egyptian Journal Of Chemistry**, Arábia Saudita, v. 63, n. 8, p. 2887-2899, 18 fev. 2020.

HASSEMER, Maria Eliza Nagel. **Tratamento de Efluente Têxtil - Processo Físico Químico com ozônio e floculação em meio granular**. 2000. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

HATIMI, B. *et al.* Physicochemical and statistical modeling of reactive Yellow 145 enhanced adsorption onto pyrrhotite Ash-Based novel (Catechin-PG-Fe)-Complex. **Materials Science For Energy Technologies**, [S.L.], v. 6, p. 65-76, 2023.

HOLTZ, Marcos *et al.* CULTIVO DE *Pleurotus ostreatus* UTILIZANDO RESÍDUOS DE ALGODÃO DA INDÚSTRIA TÊXTIL. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 3, n. 1, p. 37-51, 2009.

HU, Yaoqiang *et al.* Dye adsorption by resins: effect of ionic strength on hydrophobic and electrostatic interactions. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 228, p. 392-397, jul. 2013.

ISLAM, Md Mazedul *et al.* Mapping environmentally sustainable practices in textiles, apparel and fashion industries: a systematic literature review. **Journal Of Fashion Marketing And Management: An International Journal**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 331-353, 20 out. 2020.

JAWAD, Ali H. *et al.* High surface area and mesoporous activated carbon from KOH-activated dragon fruit peels for methylene blue dye adsorption: optimization and

mechanism study. **Chinese Journal Of Chemical Engineering**, Selangor, v. 32, p. 281-290, abr. 2021.

KADAM, Suhas K. *et al.* Co-planted floating phyto-bed along with microbial fuel cell for enhanced textile effluent treatment. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 203, p. 788-798, dez. 2018.

KESKIN, Basak *et al.* Pilot and full-scale applications of membrane processes for textile wastewater treatment: a critical review. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 42, n. 11, p. 11-11, ago. 2021.

KIFETEW, Melkamu *et al.* Adsorptive Removal of Reactive Yellow 145 Dye from Textile Industry Effluent Using Teff Straw Activated Carbon: optimization using central composite design. **Water**, Etiópia, v. 15, n. 7, p. 1281, 24 mar. 2023.

KIRAN, Shumaila *et al.* Synthesis of nickel nanoparticles using Citrullus colocynthis stem extract for remediation of Reactive Yellow 160 dye. **Environmental Science And Pollution Research**, Alemanha, v. 27, n. 26, p. 32998-33007, 10 jun. 2020.

KOSMULSKI, Marek. The pH-Dependent Surface Charging and the Points of Zero Charge. **Journal Of Colloid And Interface Science**, [S.L.], v. 253, n. 1, p. 77-87, set. 2002.

KUANG, Yu; ZHANG, Xiaoping; ZHOU, Shaoqi. Adsorption of Methylene Blue in Water onto Activated Carbon by Surfactant Modification. **Water**, Guangzhou, v. 12, n. 2, p. 1-19, 21 fev. 2020.

LIMA, Mailon *et al.* Characterization of Cellulosic Cotton Residue Produced by Sanding Process and Applied to Cement Pastes. **Preprints**, [S.L.], p. 1-13, 14 nov. 2019.

LOTITO, Adriana Maria *et al.* Textile wastewater treatment: aerobic granular sludge vs activated sludge systems. **Water Research**, [S.L.], v. 54, p. 337-346, maio 2014.

LOURENÇO, Gabriella Renata; SILVA, Taís Larissa da. Processo de pré-tratamento hidrotermal de resíduo têxtil para produção de carvão ativado. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 23., 2018, Apucarana. **Anais [...]**. Apucarana: Utfpr, 2018. p. 1-7.

LUOMA, Päivi *et al.* Future images of data in circular economy for textiles. **Technological Forecasting And Social Change**, [S.L.], v. 182, p. 1-18, 14 jul. 2022.

MEDHAT, Ahmed *et al.* Efficiently activated carbons from corn cob for methylene blue adsorption. **Applied Surface Science Advances**, Egito, v. 3, p. 1-8, mar. 2021.

MEHRA, Sukanya; SINGH, Mandeep; CHADHA, Pooja. **Adverse Impact of Textile Dyes on the Aquatic Environment as well as on Human Beings**. ResearchGate, Índia, v.28, n. 2, p. 164-176, abr-jun. 2021.

MÉTIVIER-PIGNON, Hélène; FAUR-BRASQUET, Catherine; CLOIREC, Pierre Le. Adsorption of dyes onto activated carbon cloths: approach of adsorption mechanisms and coupling of acc with ultrafiltration to treat coloured wastewaters. **Separation And Purification Technology**, França, v. 31, n. 1, p. 3-11, abr. 2003.

MOTAMEDI, Elaheh *et al.* Efficient removal of various textile dyes from wastewater by novel thermo-halotolerant laccase. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 337, p. 1-10, out. 2021.

MOUSSAVI, Gholamreza; MAHMOUDI, Maryam. Removal of azo and anthraquinone reactive dyes from industrial wastewaters using MgO nanoparticles. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 168, n. 2-3, p. 806-812, set. 2009.

NARITA, Carla Kazumi Carrascoza Yoshida. **SÍNTESE DE CARVÃO ATIVADO A PARTIR DE RESÍDUOS DE TECIDO DE ALGODÃO**. 2022. 52 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2022.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do *et al.* **Adsorção**: aspectos teóricos e aplicações ambientais. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 258 p.

NAVADA, K. Meghana *et al.* Synthesis, characterization of phyto-functionalized CuO nano photocatalysts for mitigation of textile dyes in waste water purification, antioxidant, anti-inflammatory and anticancer evaluation. **Applied Nanoscience**, Arábia Saudita, v. 11, n. 4, p. 1313-1338, 1 mar. 2021.

NIZAM, Nurul Umairah M. *et al.* The removal of anionic and cationic dyes from an aqueous solution using biomass-based activated carbon. **Scientific Reports**, Malaysia, v. 11, n. 1, p. 1-17, 21 abr. 2021.

OLIVEIRA, Helena *et al.* Comprehensive evaluation of HKUST-1 as an efficient adsorbent for textile dyes. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 30, n. 37, p. 87242-87259, 8 jul. 2023.

ONU, Chijioke Elijah *et al.* Comparative analysis of RSM, ANN and ANFIS and the mechanistic modeling in eriochrome black-T dye adsorption using modified clay. **South African Journal Of Chemical Engineering**, [S.L.], v. 36, p. 24-42, abr. 2021.

PALACIOS-MATEO, Cristina *et al.* Analysis of the polyester clothing value chain to identify key intervention points for sustainability. **Environmental Sciences Europe**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 1-25, 6 jan. 2021.

PINTO, Cláudia Vanessa Marite Garcia. **Tratamento de efluentes têxteis, por processos eletroquímicos, para a reutilização em processos de tingimento**. 2023. 159 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade da Beira Interior, Portugal, 2023.

PRAHAS, Devarly *et al.* Activated carbon from jackfruit peel waste by H₃PO₄ chemical activation: pore structure and surface chemistry characterization. **Chemical Engineering Journal**, Indonésia, v. 140, n. 1-3, p. 32-42, jul. 2008.

POURNAMDARI, Elham *et al.* Response surface methodology, and artificial neural network model for removal of textile dye Reactive Yellow 105 from wastewater using Zeolitic Imidazolate-67 modified by Fe₃O₄ nanoparticles. **International Journal Of Phytoremediation**, [S.L.], p. 1-16, 30 jun. 2023.

RASHID, Tazien *et al.* Formulation of zeolite supported nano-metallic catalyst and applications in textile effluent treatment. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 4, p. 1-39, ago. 2020.

SALEHI, R; DADASHIAN, F; ABEDI, M. Preparation of activated carbon fabrics from cotton fabric precursor. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 254, p. 1-6, out. 2017.

SALEM, Vidal. **Tingimento Têxtil: fibras, conceitos e tecnologias**. São Paulo: Blucher, 2010. 297 p.

SCHWANNINGER, M. *et al.* Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose. **Vibrational Spectroscopy**, Austria, v. 36, n. 1, p. 23-40, out. 2004.

SENAI. **Fiação**. São Paulo: Senai-Sp Editora, 2018. 156 p.

SHAKER, Zahraa M.; SALMAN, Hamida Idan; AL-BAIATI, Mohammad N.. Removal of reactive yellow 145 dye pollutant from wastewater by using a nano surface. **International Conference Of Computational Methods In Sciences And Engineering Iccmse 2021**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-1, 2023.

SHARMA, Jyotshana; SHARMA, Shubhangani; SONI, Vineet. Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: a review. **Regional Studies In Marine Science**, Rajasthan, v. 45, p. 1-17, jun. 2021.

SIDDIQUE, Maria; FAROOQ, Robina; SHAHEEN, Muhammad. Removal of Reactive Blue 19 from Wastewaters by Physicochemical and Biological Processes-A Review. **Journal of the Chemical Society of Pakistan**. 33. 284-293. (2011).

SILVA, José E. da *et al.* Estudo de Cinética e Equilíbrio de Adsorção Empregando a Casca do Coco Modificada Quimicamente para a Remoção de Pb(II) de Banho Sintético. **Revista Virtual de Química**, Ceará, v. 10, n. 5, p. 1248-1262, 5 nov. 2018.

SILVA, Liliane Andrade Sande da *et al.* Descoloração do corante Azul Brilhante de Remazol R por leveduras isoladas de moluscos do Rio Subaé, no estado da Bahia, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Bahia, v. 22, n. 6, p. 1065-1074, 3 ago. 2017. **Revista Virtual de Química**, Ceará, v. 10, n. 5, p. 1-15, nov. 2018.

SILVA, Taís Larissa da. **Estudo da obtenção e aplicação de materiais adsorventes mesoporosos de resíduos da indústria têxtil**. 2017. 133 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017.

SILVA, Taís L. *et al.* Mesoporous activated carbon fibers synthesized from denim fabric waste: efficient adsorbents for removal of textile dye from aqueous solutions. **Journal Of Cleaner Production**, Maringá, v. 171, p. 482-490, jan. 2018.

SILVA, Taís L. *et al.* Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge: adsorption studies of reactive dye remazol brilliant blue r. **Chemical Engineering Journal**, Maringá, v. 303, p. 467-476, nov. 2016.

SING, Kenneth Staffordwilliam. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Provisional). **Pure And Applied Chemistry**, [S.L.], v. 54, n. 11, p. 2201-2218, 1 jan. 1982.

SLAMA, Houda Ben *et al.* Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries, Discharge Impacts and Treatment Methods. **Applied Sciences**, Tunisia, v. 11, n. 14, p. 1-21, 6 jul. 2021.

SOMENSI, Cleder A. *et al.* Use of ozone in a pilot-scale plant for textile wastewater pre-treatment: physico-chemical efficiency, degradation by-products identification and environmental toxicity of treated wastewater. **Journal Of Hazardous Materials**, Blumenau, v. 175, n. 1-3, p. 235-240, mar. 2010.

SOUZA, Rodrigo dos Santos; MENEZES, Marizilda dos Santos; BARATA, Tomas Queiroz Ferreira. Tingimento têxtil: contextos e perspectivas dentro de uma produção mais limpa. In: Simpósio de Design Sustentável, 8., 2021, Curitiba. [S.L.], 202. p. 145-156.

SRINIVASAN, Shantkriti; SADASIVAM, Senthil Kumar. Biodegradation of textile azo dyes by textile effluent non-adapted and adapted *Aeromonas hydrophila*. **Environmental Research**, Índia, v. 194, p. 1-10, mar. 2021.

TANG, M. M.; BACON, Roger. Carbonization of cellulose fibers—I. Low temperature pyrolysis. **Carbon**, v. 2, n. 3, p. 211–220, 1964.

TAVANGAR, Tohid *et al.* Toward real textile wastewater treatment: membrane fouling control and effective fractionation of dyes/inorganic salts using a hybrid electrocoagulation ∴ nanofiltration process. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 216, p. 115-125, jun. 2019.

TEXTILE EXCHANGE. **Polyester is the most widely used fiber worldwide**. Disponível em: <https://textileexchange.org/polyester/>. Acesso em: 21 ago. 2023.

TRUTZSCHLER. **Máquinas**: linha de abertura. Linha de abertura. Disponível em: <https://www.truetzschler.com/pt/spinning/transferencias/>. Acesso em: 20 ago. 2023.

VELUSAMY, Sasireka *et al.* A Review on Heavy Metal Ions and Containing Dyes Removal Through Graphene Oxide-Based Adsorption Strategies for Textile Wastewater Treatment. **The Chemical Record**, Cornwall, v. 21, n. 7, p. 1570-1610, 4 fev. 2021.

WANG, Hanxi *et al.* Preparation of straw activated carbon and its application in wastewater treatment: a review. **Journal Of Cleaner Production**, Changchun, v. 283, p. 1-19, fev. 2021.

YANG, Ru *et al.* Surface texture, chemistry and adsorption properties of acid blue 9 of hemp (*Cannabis sativa* L.) bast-based activated carbon fibers prepared by phosphoric acid activation. **Biomass And Bioenergy**, China, v. 35, n. 1, p. 437-445, jan. 2011.

ZHAO, Jingjing *et al.* Zr-MOFs loaded on polyurethane foam by polydopamine for enhanced dye adsorption. **Journal Of Environmental Sciences**, [S.L.], v. 101, p. 177-188, mar. 2021.

ZHENG, Jieying *et al.* Preparation and characterization of activated carbon fiber (ACF) from cotton woven waste. **Applied Surface Science**, Pequim, v. 299, p. 86-91, abr. 2014.