



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Agatha Martins de Carvalho

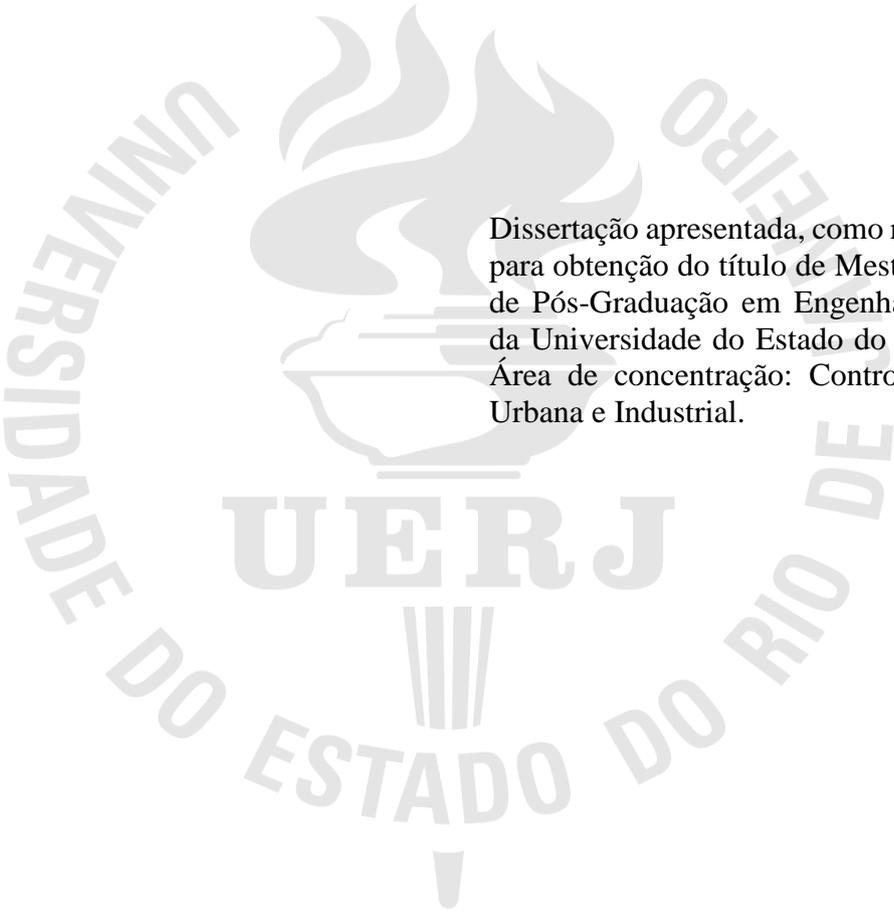
Avaliação da pirólise no manejo de resíduos têxteis mistos

Rio de Janeiro

2023

Agatha Martins de Carvalho

Avaliação da pirólise no manejo de resíduos têxteis mistos



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Área de concentração: Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof.^a Dra. Daniele Maia Bila

Coorientadora: Prof.^a Dra. Mônica Regina da Costa Marques Calderari

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C331 Carvalho, Agatha Martins de.
Avaliação da pirólise no manejo de resíduos têxteis mistos / Agatha Martins de Carvalho. – 2023.
77 f.

Orientadora: Daniele Maia Bila.
Coorientadora: Mônica Regina da Costa Marques Calderari.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Pirólise - Teses. 3. Tecidos - Teses. 4. Indústria têxtil - Teses. 5. Gestão integrada de resíduos sólidos - Teses. I. Bila, Daniele Maia. II. Calderari, Mônica Regina da Costa Marques. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.54:677

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Agatha Martins de Carvalho

Avaliação da pirólise no manejo de resíduos têxteis mistos

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Área de concentração: Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 21 de novembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dra. Daniele Maia Bila

Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof.^a Dra. Mônica Regina da Costa Marques Calderari

Departamento de Química Orgânica – UERJ

Prof.^a Dra. Elisabeth Ritter

Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Dra. Andréia Silveira Freire Soares

Químea Inteligência Ambiental

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à todos presentes na minha vida, pois cheguei aqui graças a vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro à Deus e aos meus mentores por terem me guiado para esta oportunidade única de realizar esse mestrado. Mesmo tendo sido majoritariamente realizado durante o período da pandemia, nunca me senti desamparada, seja nas aulas ou no laboratório.

À minha avó Mirtes, sou grata por sempre me ensinar que a educação deve ser priorizada, desde quando eu era uma criança você sempre me incentivou, me ensinando com livros e atlas em casa, até me apoiar ao longo da faculdade e do mestrado. Te amo vó.

A quem me estruturou ao longo de toda essa trajetória, minha família, eu amo vocês. Lembro até hoje quando recebi o e-mail dizendo que fui aprovada no mestrado, eu estava jogando Scrabble com Pedro numa noite agradável na nossa sala. Chorei de felicidade e ele e minhas filhas estavam ali para me acolher e celebrar comigo, bem como meus pais quando liguei contando sobre a notícia. Saibam que todos vocês são meu bem mais precioso.

À Jacque, que me auxiliou na escolha do tema, lá em 2018, quando fizemos intercâmbio juntas, bem como na preparação do pré-projeto.

Sou grata aos meus colegas de turma, pelo companheirismo e apoio, pois, mesmo que só tenhamos nos visto poucas vezes, a turma toda foi acolhedora e sempre estávamos dispostos a enfrentar as adversidades e alegrias juntos. Rafa, obrigada por me socorrer quando eu achava que tinha chegado no fim do poço, você sempre achava uma luz e uma possibilidade de seguir em frente, me ajudando a achar uma solução, e isso eu nunca esquecerei.

Não tenho como descrever a honra de ter tido aula com professores tão dedicados e sábios, além de serem humildes a ponto de ensinar aprendendo a cada aula. Beth, João, Camille, saibam que vocês mudaram minha visão de mundo quanto aos resíduos e sou extremamente grata a vocês por isso. Realmente, a educação muda as pessoas, e eu mudei para melhor.

Durante o período de laboratório, cheguei sem nenhuma experiência e tive que aprender que tudo tem seu tempo, que a paciência e a precisão são importantes e que a persistência é algo bom, porém deve-se saber quando ela se torna teimosia. Todos esses ensinamentos, além de companheirismo, humildade, compaixão, solidariedade e disciplina, aprendi no LABTAM com cada um dos meus colegas de laboratório. Maria Elena, Rodrigo, Edgard, Carol, Andressa, Letícia e Rafael, obrigada pela paciência com essa pessoa cabeça-dura que eu sou, obrigada pelos conselhos, pelas dores e alegrias compartilhadas e por me acolherem por todo esse tempo.

Aos meus tios Paulo e Rosi, que sofreram e vibraram comigo todos os dias que eu voltava do laboratório com alguma novidade, agradeço por me acolherem em sua casa nesse período e serem como pais para mim, não somente durante o mestrado, mas desde sempre.

E por último, mas não menos importante, às minhas incríveis orientadoras. Dani, obrigada por não querer me mudar e embarcar nessa jornada comigo mesmo não sendo totalmente a sua área. Mônica, não tenho palavras, realmente. Você estava ali para me colocar de volta nos eixos quando eu pensava demais, me levantar, me acolher, me corrigir e sorrir comigo, sempre paciente. Mesmo extremamente atarefada você nunca deixou de me escutar, me aconselhar e ser inspiração para mim.

Também agradeço a todos que direta ou indiretamente me ajudaram e me guiaram para o lugar que estou hoje.

There's nothing you can do that can't be done.

The Beatles

RESUMO

CARVALHO, Agatha Martins de. *Avaliação da pirólise no manejo de resíduos têxteis mistos*. 2023. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

A indústria têxtil, com sua significativa contribuição social e econômica, enfrenta desafios na gestão eficaz de seus resíduos, especialmente devido à falta de dados concretos sobre seu descarte e pelo fato de os resíduos têxteis serem a maior causa de poluição por microplásticos nos oceanos. Propõe-se investigar a pirólise de dois tipos de tecidos têxteis mistos de algodão com poliéster, com porcentagens 80% algodão/20% poliéster e 65% algodão/35% poliéster, a fim de se analisar a sua eficiência no manejo de resíduos têxteis. Os tecidos foram caracterizados por meio de Análise Termogravimétrica (TGA), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). Foram feitas pirólises com dois focos. A primeira foi realizada em forno de TGA (800°C) para averiguar a redução de massa e análise no microscópio para detecção de microplásticos. A segunda, realizada em forno de leito fixo (450°C – 485°C), para um possível beneficiamento do resíduo gerado, ativando-o quimicamente com cloreto de zinco ($ZnCl_2$) para analisá-lo em testes de adsorção com azul de metileno. Ambos tecidos, no MEV, apresentaram tramas semelhantes. No TGA, os tecidos apresentaram temperatura de degradação similar, variando entre 422°C e 425°C. No FTIR pôde-se perceber grupos funcionais que comprovam que ambos tecidos apresentam algodão e poliéster em sua composição. Os resultados da primeira pirólise mostraram que houve redução de mais de 84% da massa em ambos os tecidos, havendo detecção de microplásticos nos resíduos gerados em todas as amostras analisadas, com projeção de geração de até 25,77 milhões de microplásticos por quilo de resíduo gerado. Na segunda pirólise, notou-se que, nas análises e condições realizadas, o resíduo gerado não se demonstraram adequados para uso como carvões ativados visando adsorção de contaminantes em meio aquoso. Nota-se que a pirólise é uma alternativa eficaz para gestão de resíduos têxteis, visto que apresenta um alto grau de redução da massa desses resíduos, havendo a necessidade de serem descartados de forma correta devido à alta geração de microplásticos analisada.

Palavras-chave: Pirólise. Tecidos têxteis mistos. Microplástico. Gestão de resíduos têxteis.

ABSTRACT

CARVALHO, Agatha Martins de. *Evaluation of pyrolysis in mixed textile waste management*. 2023. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Textile industry, with its significant social and economic contribution, faces challenges in effectively managing its waste, especially due to the lack of significant data on its disposal and to the fact that textile waste is the leading cause of microplastic pollution in the ocean. This study aims to investigate pyrolysis of two types of mixed cotton-polyester textile fabrics, 80% cotton/20%polyester and 65%cotton/35%polyester, to analyze pyrolysis efficiency in textile waste management. The fabrics were characterized using Thermogravimetric Analysis (TGA), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Two pyrolysis processes were conducted: the first was carried out in a TGA furnace (800°C) to assess mass reduction and microscopic analysis for microplastic detection. The second was performed in a fixed-bed furnace (450°C – 485°C) to potentially enhance the generated residue's value by chemically activating it with zinc chloride (ZnCl₂) for analysis in methylene blue adsorption tests. Both fabrics exhibited similar weaves in SEM. In TGA, the fabrics displayed similar degradation temperatures, ranging between 422°C and 425°C. FTIR analysis revealed functional groups confirming the presence of both cotton and polyester in their composition. The results of the first pyrolysis showed a reduction of over 84% in mass for both fabrics, with microplastic detection in the generated residues from all samples analyzed, projecting a generation of up to 25.77 million microplastics per kilogram of generated waste. In the second pyrolysis, it was observed that, under the conducted analyses and conditions, the generated residues were not suitable for use as activated carbons for adsorbing contaminants in aqueous solutions. It is noteworthy that pyrolysis is an effective alternative for managing mixed textile waste, as it exhibits a high degree of mass reduction in these residues. Therefore, there is a need for proper disposal due to the high generation of microplastics observed.

Keywords: Pyrolysis. Mixed textile fabrics. Microplastic. Textile waste management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma metodológico.....	29
Figura 2 - Microscópio Olympus BX60.....	34
Figura 3 - Microscópio Olympus SZ61 acoplado a um notebook.....	35
Figura 4 - Tecido em agitação e aquecimento em placa de agitação e aquecimento.....	36
Figura 5 - Filtração do tecido em funil de vidro.....	37
Figura 6 - Painel de controle de temperatura do forno em isoterma.....	38
Figura 7 - Conjunto completo do forno em isoterma.....	39
Figura 8 - Reator do forno com rampa de temperatura.....	40
Figura 9 – Rotâmetro.....	40
Figura 10 - Conjunto completo do forno com rampa de temperatura.....	41
Figura 11 - Carvão imerso em água destilada aquecida.....	42
Figura 12 - Carvões sendo filtrados em papel de filtro em funil de vidro.....	42
Figura 13 - Tecido triline mista importada 80% algodão/20% poliéster em diferentes escalas.....	45
Figura 14 - Tecido triline mista importada 65% algodão/35% poliéster em diferentes escalas.....	45
Figura 15 - TGA do tecido 80% algodão / 20% poliéster.....	46
Figura 16 - TGA do tecido 65% algodão / 35% poliéster.....	47
Figura 17 - FTIR do tecido 80% algodão/20% poliéster.....	48
Figura 18 - FTIR do tecido 65% algodão/35% poliéster.....	48
Figura 19 - Fórmula estrutural da celulose.....	49
Figura 20 - Fórmula estrutural do poliéster (PET).....	49
Figura 21 – Quantidade de fibras encontradas nos resíduos de pirólise.....	52
Figura 22 – Imagens das fibras de tecido encontradas no resíduo pirolisado do tecido 80% algodão / 20% poliéster no microscópio Olympus BX60 – Zoom 50x.....	53
Figura 23 – Imagens das fibras de tecido encontradas no resíduo pirolisado do tecido 65% algodão / 35% poliéster no microscópio Olympus BX60 – Zoom 50x.....	53
Figura 24 – Imagem de fibra de tecido encontrada em resíduo pirolisado do tecido 65% algodão / 35% poliéster no microscópio Olympus SZ61 - Zoom 40x.....	54
Figura 25 - Imagem de fibra de tecido encontrada em resíduo pirolisado do tecido 80% algodão / 20% poliéster no microscópio Olympus SZ61 - Zoom 180x.....	54

Figura 26 – Imagem do tecido cortado em quadrados de 1cm.....	56
Figura 27 – Imagem do tecido pirolisado não carbonizado por completo.....	56
Figura 28 – Imagem do tecido desfiado.....	56
Figura 29 – Imagem do resíduo do tecido pirolisado completamente carbonizado.....	57
Figura 30 – Imagem do tecido cortado em quadrado de 1cm e desfiado.....	57
Figura 31 – Imagem do condensador de vidro quebrado.....	59
Figura 32 – Porcentagens de resíduo gerado por temperatura e tipo de tecido.....	61
Figura 33 - Porcentagens de resíduo gerado nas pirólises por tipo de tecido.....	62
Figura 34 – Porcentagens de resíduo gerado nas pirólises por tipo de forno.....	63
Figura 35 - Curva de calibração do azul de metileno.....	65
Figura 36 - Gráfico de cinética de adsorção do CAC (20mg) com azul de metileno (25mg/L).....	66
Figura 37 - Amostras do teste de adsorção de CAC (20mg) com azul de metileno (100mg/L) – N° 7 da Tabela 10.....	67
Figura 38 - Amostras antes de passarem pelo teste de adsorção – N° 13 da Tabela 10.....	68
Figura 39 - Amostras após passarem pelo shaker e pela centrífuga – N° 13 da Tabela 10.....	68
Figura 40 - Resíduo pirolisado de tecidos em água.....	69
Figura 41 - Resíduo pirolisado de tecidos em azul de metileno.....	69
Figura 42 - Lã de vidro antes e depois da passagem de azul de metileno.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pirólises para formação de carvão ativado.....	27
Tabela 2 – Reagentes e materiais de laboratório usados nos experimentos.....	30
Tabela 3 - Equipamentos e análises utilizados.....	30
Tabela 4 - Dados da pirólise em TGA.....	50
Tabela 5 - Comparação de geração dos produtos da pirólise entre tecidos têxteis.....	51
Tabela 6 - Quantidade de fibras de tecido encontradas nas pirólises feitas em TGA.....	52
Tabela 7 - Dados dos preparos dos tecidos para a pirólise.....	58
Tabela 8 - Dados das pirólises realizadas.....	60
Tabela 9 - Dados do espectrofotômetro.....	64
Tabela 10 - Dados dos testes de adsorção.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ATR	Reflexão Total Atenuada
CAC	Carvão ativado comercial
EUA	Estados Unidos da América
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier
GEE	Gases do efeito estufa
GFA	<i>Global Fashion Agenda</i>
LABTAM	Laboratório de Tecnologia Ambiental
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PET	Politereftalato de etileno
PIB	Produto Interno Bruto
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
TGA	Análise Termogravimétrica
UE	União Europeia
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
H ₂	Gás hidrogênio
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Gás metano
CO	Monóxido de carbono
ZnCl ₂	Cloreto de Zinco
kg	Quilograma
hab	Habitante
US\$	Dólar americano
L	Litro
ha	Hectare
µm	Micrômetro
mm	Milimetro
H ₃ PO ₄	Ácido Fosfórico
KOH	Hidróxido de potássio
min	Minuto
mL	Mililitro
g	Gramma
K ₂ CO ₃	Carbonato de potássio
N ₂	Gás nitrogênio
cm	Centimetro
kV	Quilovoltagem
mg	Miligramma
h	Hora
nm	Nanômetro
rpm	Rotações por minuto
s ²	Segundo ao quadrado
(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	Fórmula química da celulose
CH ₂	Metileno
C=O	Carbonila

C	Carbono
O	Oxigênio

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
1 OBJETIVOS.....	19
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 Gestão de resíduos sólidos urbanos.....	20
2.2 Gestão de resíduos têxteis.....	20
2.2.1 Relevância da indústria têxtil.....	21
2.2.2 Legislação ambiental	22
2.2.3 Impactos gerados	23
2.2.4 Tricoline mista	24
2.3 Pirólise.....	24
2.3.1 Aplicabilidade	25
2.3.2 Pirólise de resíduos têxteis.....	26
3 METODOLOGIA	29
3.1 Fluxograma metodológico.....	29
3.2 Materiais	29
3.3 Caracterização dos tecidos.....	32
3.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	32
3.3.2 Análise Termogravimétrica (TGA)	32
3.3.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	33
3.4 Pirólise para gestão de resíduos.....	33
3.4.1 Análises no microscópio para averiguar presença de microplásticos.....	34
3.5 Pirólise para beneficiamento do resíduo gerado.....	35
3.5.1 Preparo dos tecidos	35
3.5.1.1 Lavagem dos tecidos	36
3.5.1.2 Ativação química com ZnCl ₂	37
3.5.2 Pirólise em fornos de leito fixo vertical.....	37
3.5.2.1 Utilização do forno de leito fixo vertical em isoterma.....	38
3.5.2.2 Utilização do forno de leito fixo vertical com rampa de temperatura.....	39
3.5.3 Lavagem dos carvões gerados	41
3.5.4 Ensaio de adsorção	43
3.5.4.1 Testes de adsorção com azul de metileno	43

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Caracterização do tecido	45
4.1.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	45
4.1.2	Análise Termogravimétrica (TGA)	46
4.1.3	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	47
4.2	Pirólise para eficiência na gestão de resíduos	50
4.2.1	Análises no microscópio	51
4.3	Pirólise para beneficiamento do resíduo gerado.....	55
4.3.1	Preparo dos tecidos	55
4.3.2	Pirólise em fornos de leito fixo vertical.....	59
4.3.3	Ensaio de adsorção	64
	CONCLUSÃO.....	71
	SUGESTÕES FUTURAS	72
	REFERÊNCIAS	73

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil tem considerável relevância a nível nacional quanto à geração de empregos, produção, importação, exportação e investimentos (PINHEIRO; FRANCISCO, 2013), sendo o 2º maior empregador da indústria de transformação com produção média de 8,1 bilhões de peças em 2021 (ABIT, 2023). Além disso, o Brasil está entre os quatro maiores produtores de malhas do mundo, sendo referência mundial em design de diversos segmentos de vestuário, o que posiciona o Brasil como a maior cadeia têxtil completa do Ocidente (ABIT, 2023).

As duas fibras mais utilizadas mundialmente são o algodão e o poliéster e, atualmente, a mistura destas fibras em tecidos é bastante utilizada devido a melhorias significativas na resistência, desempenho, durabilidade e conforto do material produzido (PEREIRA, 2009). O poliéster é a fibra que apresenta maior crescimento constante de demanda em escala global, enquanto o algodão permanece com consumo estável, porém igualmente elevado (ITMF, 2017). A demanda por estas fibras tende a aumentar devido ao crescimento populacional, que acarretará em mais resíduos têxteis sendo descartados, além de haver uma necessidade cada vez maior de energia para abastecer todo esse processo, que vai desde a extração da matéria prima, até o seu descarte final (ITMF, 2017).

De acordo com a Recicla Sampa (2020), são geradas cerca de 160 mil toneladas de resíduos têxteis por ano no Brasil. Estima-se que 78,26% dos resíduos têxteis destinados a aterros sanitários entre 2017-2021 (SUSTEXMODA, 2021) são provenientes do setor de corte de peças, o qual apresenta maior geração de resíduos têxteis em forma de retalhos (MENEGUCCI *et al.*, 2015; PINHEIRO; FRANCISCO, 2013).

Mesmo que o Brasil tenha como principal fonte de destinação final de resíduos sólidos os aterros sanitários, que compõe 60,5% (ABRELPE, 2023), a disposição inadequada ainda é presente em todas as regiões do país. E, mesmo os metais pesados não sendo os maiores componentes encontrados nos lixiviados de aterros sanitários, estes são utilizados como componentes no tingimento no processo de produção de diversas peças de vestuário, e, ao entrarem em contato direto com o solo ou corpos hídricos, podem causar contaminação (YOUSEF *et al.*, 2019).

Além disso, estima-se que a indústria têxtil, em todos os setores, desde a produção, uso e descarte, é responsável pela disseminação de microplásticos no ambiente, derivados das fibras de seus tecidos. A área que mais causa poluição por microplásticos nos oceanos é a da lavagem

de tecidos, sendo responsável por 35% dos microplásticos encontrados e a secagem de roupas em máquinas gera de 400.000 a 500.000 dessas partículas a cada 15 minutos de uso da máquina (YADAV *et al.*, 2023).

Tendo isso em vista, a pirólise se torna uma possível solução para a problemática ambiental por possuir vantagens significativas sobre outros métodos de reciclagem de resíduos, por reduzir o volume do resíduo de forma considerável, ao expô-lo a altas temperaturas que variam entre 250-800°C, e decompô-lo em três diferentes substâncias com propriedades combustíveis: óleo pirolítico, carvão e gás, em diferentes proporções, sendo este último composto majoritariamente por H₂, CO₂, CH₄ e CO (SILVEIRA, 2015; VIANA, 2013). Estes produtos da pirólise podem retroalimentar o processo ou serem utilizados como fonte de energia em outros setores da indústria (VIANA, 2013), fazendo com que o uso desse sistema siga com os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, ao promover a redução, tratamento e reciclagem dos resíduos têxteis.

Visto isso, a presente pesquisa tem como objetivo investigar a pirólise de dois tipos de tecidos Tricoline Mista Importada com diferentes porcentagens de algodão e poliéster, a fim de se avaliar a eficiência da pirólise em uma efetiva gestão dos resíduos têxteis mistos, além de averiguar a existência de microplásticos no carvão gerado, bem como a possibilidade de um beneficiamento do carvão gerado por meio de ativação química com cloreto de zinco (ZnCl₂).

1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo investigar a pirólise de dois tipos de tecidos Tricoline Mista Importada de cor branca, para não haver possíveis interferências nos resultados por conta da composição de corantes, com diferentes porcentagens de algodão e poliéster, a fim de se analisar a sua eficiência no manejo de resíduos têxteis.

Objetivos específicos

- Analisar a eficiência da pirólise na redução da massa dos resíduos têxteis tricoline mista 80% algodão/20% poliéster e 65% algodão/35% poliéster;
- Averiguar a existência de microplásticos no resíduo final da pirólise dos tecidos tricoline mista 80% algodão/20% poliéster e 65% algodão/35% poliéster;
- Analisar se o resíduo gerado pela pirólise pode ter beneficiamento por meio da ativação com $ZnCl_2$ e teste de adsorção com azul de metileno.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Gestão de resíduos sólidos urbanos

Mundialmente, são gerados em média 0,74 kg/hab/dia de resíduos sólidos urbanos, sendo a média da América Latina de 0,99 kg/hab/dia e do Brasil de 1,04 kg/hab/dia. Estima-se que em 2030, o mundo gere 2,59 bilhões de toneladas de resíduos anualmente, com projeções para chegar a 3,4 bilhões de toneladas em 2050 (KAZA *et al*, 2018).

A composição dos resíduos sólidos urbanos varia de acordo com o poder econômico do local. Entretanto, em escala global, 44% dos resíduos são derivados de matéria orgânica, seguidos por papel e papelão com 17% e 14% de outros resíduos (KAZA *et al*, 2018). Já no Brasil, segundo Hendges (2021), o resíduo mais encontrado é igual ao do panorama global, com 45,3% de matéria orgânica, seguido por 16,8% de plástico.

Quanto ao descarte dos resíduos sólidos urbanos, globalmente, 37% são destinados a aterros sanitários, 33% a lixões a céu aberto, 19% passam por reciclagem ou compostagem e 11% são tratados por incineração ou pirólise (KAZA *et al*, 2018). No Brasil, segundo a Abrelpe (2023), em 2022 foram geradas mais de 81 milhões de toneladas de resíduos, sendo 93% coletados e, dentre estes, 60,5% vão para aterros sanitários e o restante para lixões e aterros controlados.

2.2 Gestão de resíduos têxteis

No Brasil, a geração de resíduos têxteis é de mais de 160 mil toneladas por ano, sendo que cerca da metade poderia ser reciclada (RECICLA SAMPA, 2020). Na China, essa geração ultrapassa 20 milhões de toneladas por ano (XU *et al*, 2018). Já na União Europeia (UE), a geração de resíduos têxteis e de vestuário é de aproximadamente 16,5 milhões de toneladas por ano (NAHIL; WILLIAMS, 2010). Desde o início da pandemia de COVID-19, que começou em 2019, o consumo de têxteis como algodão, polipropileno e poliéster aumentou, pois são recomendados para serem usados em máscaras reutilizáveis com múltiplas camadas (WHO, 2021).

A maioria dos resíduos têxteis é ou aterrada ou incinerada, já que a reciclagem é difícil e resulta em produtos de baixa qualidade, geralmente a custos elevados, correspondendo a apenas 12% do descarte final pós-uso (CHEN *et al.*, 2019; BEALL, 2020). Se esses resíduos forem descartados de forma incorreta, podem causar contaminação do solo e das águas subterrâneas, devido aos metais pesados que são usados como componentes de corante em seu processo de produção (YOUSEF *et al.*, 2019).

Mais de 69% dos resíduos têxteis acabam em aterros sanitários (YOUSEF *et al.*, 2019), o que gera preocupações, uma vez que os têxteis podem levar mais de 200 anos para se decompor, dependendo das fibras que os compõem (BROWN, 2021). Entre os resíduos têxteis que são aterrados, existem os reutilizáveis e os não reutilizáveis. Os primeiros têm qualidade apropriada, geralmente feitos de fibras têxteis não misturadas, e podem retornar como outros tipos de materiais têxteis após a triagem. Os últimos são de baixa qualidade, geralmente feitos de tecidos mistos, sendo aterrados ou incinerados (YOUSEF *et al.*, 2019; MENEGUCCI *et al.*, 2015; PINHEIRO; FRANCISCO, 2013).

Como os resíduos têxteis são ricos em celulose, e a quantidade de energia recuperada em processos térmicos depende fortemente da concentração desse componente na matéria-prima, esse tipo de resíduo pode ser considerado como uma fonte de energia renovável por meio de métodos modernos de conversão de energia (YOUSEF *et al.*, 2019). A incineração é tipicamente utilizada como tratamento térmico para recuperação de energia e produção de óleo e produtos químicos. No entanto, para aumentar os benefícios econômicos, a pirólise é uma alternativa mais atraente a ser utilizada, pois ela decompõe os compostos orgânicos em uma atmosfera inerte, a temperaturas variando de 250-800°C, gerando gás, carvão e óleo (VIANA, 2013; YOUSEF *et al.*, 2019; SILVEIRA, 2015). Os produtos da pirólise têm propriedades combustíveis que permitem que sejam utilizados para alimentar o processo de pirólise ou como fonte de energia para outros setores industriais (VIANA, 2013).

2.2.1 Relevância da indústria têxtil

Ao todo, existem três tipos de fibras têxteis: sintéticas, naturais e artificiais. As sintéticas dominam o mercado, sendo 62,3% do total fabricado em 2018, seguidas pelas fibras naturais, com 31,5% e, por último, as fibras artificiais com 6,2%. Em escala mundial, a produção de fibras, em 2018, foi de aproximadamente 107 milhões de toneladas, sendo o poliéster e o

algodão as mais fabricadas, com projeção de chegar a produção de 145 milhões de toneladas em 2030 (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020).

A cadeia produtiva brasileira é a maior do ocidente, sendo a mais completa pois vai desde o plantio, confecções e comercialização para o consumidor final, contando com mais de 22 mil unidades produtivas, sendo 90% destas pertencentes a micro e pequenas empresas (SANTOS, 2023).

O panorama do Brasil dentro do mercado têxtil é relevante, visto que é o 5º maior produtor têxtil do mundo e o 8º maior país consumidor, sendo essa indústria responsável por 5,5% do PIB nacional e por empregar, direta e indiretamente, 9,34 milhões de pessoas, sendo 75% de mão de obra feminina. Além disso, o Brasil possui 50 faculdades de moda pelo país, 22,5 mil unidades produtivas formais, exportou mais de US\$ 1,14 bilhão em 2022, sem contar com a fibra de algodão, com produção de 2,16 milhões de toneladas de têxteis em 2021 (ABIT, 2023; MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020).

2.2.2 Legislação ambiental

Com toda essa produção em massa no Brasil, a logística para reciclagem e descarte correto dos resíduos têxteis acaba por se tornar um assunto relevante. No Brasil, existe a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), criada pela Lei Nº 12.305/2010, um marco que desencadeou a criação de políticas e planos estaduais e municipais para o descarte adequado de resíduos no Brasil. Além dela, em 2022, houve a criação do Decreto Nº 10.936/2022, que trouxe uma nova regulamentação à PNRS e do Decreto Nº 11.043/2022, que institui o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), sendo esse o principal instrumento previsto na Lei Nº 12.305/2010 que estabelece diretrizes, estratégias e metas para o setor, em um horizonte de 20 anos. Existe também a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), que gera todos os anos o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, apresentando estatísticas e dados sobre a destinação e gravimetria dos resíduos sólidos gerados no país ao longo do ano (ABRELPE, 2023).

Entretanto, no Panorama (ABRELPE, 2023), não há dados oficiais sobre o atual cenário dos resíduos têxteis no Brasil. Com isso, percebe-se a necessidade de se entender melhor a produção e geração desse setor, que vem crescendo graças ao incentivo ao consumo rápido,

pois a falta de políticas de gestão desses resíduos dificulta o mapeamento dos reais impactos sociais e ambientais oriundos dessa indústria (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020).

2.2.3 Impactos gerados

A indústria têxtil baseia-se no conceito de obsolescência programada, no qual tendências e modas são criadas para alimentar rápidos ciclos de consumo para atender a um grande número de consumidores de uma forma não sustentável, por meio do consumo linear. A baixa qualidade, pouco uso e troca frequente de itens dessa indústria geram um grande volume de descarte de resíduos têxteis e a tornam um ramo altamente poluente para o meio ambiente (ALBUQUERQUE, 2019).

No Brasil, o cultivo do algodão é o quarto que mais consome agrotóxicos, com aplicação média de pesticidas de 28L/ha, sendo responsável por aproximadamente 10% do volume total de pesticidas utilizados no país (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020). Além disso, o algodão normalmente é tingido com corantes que contém ácidos, sólidos solúveis e compostos tóxicos, que causam, tanto a contaminação dos recursos hídricos, quanto de animais, plantas e do ser humano, além de serem de difícil remoção do ambiente (TONIOLLO; ZANCAN; WÜST, 2015).

Outro problema gerado pelo descarte incorreto de resíduos têxteis são os microplásticos. Estes são pedaços de materiais sintéticos que são majoritariamente encontrados em forma de fragmentos, *pellets* e fibras, com diversas cores e tamanhos variando de 1 μm a 5 mm, podendo ser encontrados em praias, gelos, sedimentos, solos, ar, colunas de água doce e salgada e até em regiões remotas como o Antártico e o Ártico. Em ambientes internos, os microplásticos encontrados no ar são majoritariamente derivados de tecidos sintéticos, devido aos danos causados pelo uso, secagem, lavagem e atrito (CAIXETA *et al.*, 2022). Além disso, o poliéster, por ser uma fibra derivada do petróleo, está fortemente relacionada à presença de microplásticos nos corpos hídricos, visto que, ao passar pelo processo de lavagem, suas fibras se soltam e se quebram, passando pelo tratamento de esgoto até chegar nos mares e oceanos (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020). Pela sua forma linear e flexibilidade, as fibras têxteis são um dos tipos de microplásticos mais encontrados no solo, podendo afetar a dinâmica e funcionalidade do mesmo. Vale ressaltar que os microplásticos podem adsorver metais pesados, desreguladores endócrinos, pesticidas e microorganismos (CAIXETA *et al.*, 2022). Esta

situação torna-se alarmante, visto que estima-se que aproximadamente de 74.000 a 113.000 microplásticos entram no corpo humano anualmente, seja por ingestão ou inalação (CAIXETA *et al.*, 2022).

De acordo com o relatório Fashion on Climate, produzido pela McKinsey & Company e Global Fashion Agenda (GFA) em 2020, a indústria da moda é responsável por 4% da emissão global de gases do efeito estufa (GEE), em torno de 2,1 bilhões de toneladas, o equivalente às emissões da França, Alemanha e Reino Unido combinadas, em 2018. Desse montante, 70% das emissões são geradas na fase de produção, com destaque para produção de matéria prima. Os 30% restantes são gerados nas atividades relacionadas às vendas, uso e descarte dos produtos (COMPANY; AGENDA, 2020).

Os impactos também passam pela esfera social, pois, durante o processo de fiação, principalmente da fibra de algodão, solta-se uma poeira fina que está associada à geração de problemas respiratórios crônicos aos trabalhadores. Além disso, um outro problema do setor é a alta taxa de contratação de mão de obra informal, sendo maior nos processos de corte e costura (MODEFICA; FGVCES; REGENERATE, 2020).

2.2.4 Tricoline mista

Tricoline é um tecido versátil, resistente e maleável com vantajosa relação custo-benefício, sendo utilizado em artesanato, em enxovais e roupas de cama, na confecção de peças de moda de forma geral, em patchwork, em itens de decoração e, ultimamente, como tecido para a confecção de máscaras faciais de proteção (DECOR, 2020).

Tricoline pode ser encontrado na forma 100% algodão e na forma de tricoline mista, com diferentes porcentagens de poliéster e algodão.

2.3 **Pirólise**

Pirólise é o nome dado à decomposição térmica de materiais orgânicos a altas temperaturas na ausência de oxigênio, gerando produtos que podem ser reciclados ou transformados em energia, como gás, óleo e carvão. Seus processos podem ser classificados em

dois grupos: baixa temperatura, que produz majoritariamente óleo e carvão, e alta temperatura, que produz majoritariamente gás (REZAIYAN; CHEREMISINOFF, 2005).

Por ocorrer em ambiente inerte, essa tecnologia gera energia mais limpa do que a incineração, pois seus produtos apresentam grande quantidade de poder calorífico devido à falta de oxigênio, podendo ser utilizados para fins energéticos tanto no próprio sistema pirolítico, quanto em outros sistemas (TEIXEIRA, 2019).

Nesse processo ocorre a fragmentação das moléculas da amostra do material em fragmentos estáveis. Caso os parâmetros energéticos utilizados (tempo, temperatura e taxa de aquecimento) sejam controlados em uma escala reproduzível, toda vez que uma amostra idêntica for aquecida da mesma maneira, os fragmentos gerados terão a mesma distribuição em pequenas moléculas e carregarão consigo as mesmas informações sobre o arranjo da macromolécula original (WAMPLER, 2007).

De acordo com Sousa (2009), os parâmetros mais utilizados na pirólise são: taxa de aquecimento, que influencia na produção dos gases, ou seja, quanto maior for este parâmetro, maior será a produção dos gases; temperatura, a qual apresenta a mesma relação com os gases que a taxa de aquecimento; tempo de residência; composição dos materiais a degradar, quanto menor for o tamanho das partículas do material submetido à pirólise, mais rápido será o processo por conta da maior transferência de calor.

2.3.1 Aplicabilidade

A pirólise é uma técnica que vem sendo utilizada desde antes do século 18, tradicionalmente na fabricação de carvão vegetal. No período de 1700 a pirólise de carvão era utilizada para a produção de coque para a indústria siderúrgica e o seu gás era utilizado para iluminação. No início de 1800 o gás produzido por esse processo foi primeiro utilizado na iluminação pública em Londres, se expandindo para Nova York, Baltimore e outras grandes cidades. Entretanto, a descoberta de grandes jazidas de petróleo de baixo custo acabou com as práticas comerciais em larga escala da conversão de carvão, xisto betuminoso e areias betuminosas em gases e combustíveis líquidos por meio da pirólise, liquefação e gaseificação. Apesar disso, com o passar do tempo, o desenvolvimento da pirólise continuou em países da União Europeia, EUA, Brasil e Japão com ênfase em questões ambientais, utilizando a de baixa

temperatura para a produção de biocombustíveis e a de alta temperatura, incluindo a de plasma, para a destruição de resíduos perigosos (REZAIYAN; CHEREMISINOFF, 2005).

A pirólise, ao ter seus produtos analisados por cromatografia gasosa, espectrometria de massa ou espectrometria infravermelha, é chamada de pirólise analítica. Essa técnica é principalmente aplicada na análise de polímeros, podendo ser tanto naturais quanto sintéticos. Produtos de madeira, tintas, couro, vernizes, garrafas, alimentos, fibras têxteis, sacos plásticos e papelão e papel são exemplos da maior parte dos polímeros que entramos em contato diariamente. Conseqüentemente, o estudo de materiais usando a pirólise tornou-se bem amplo, sendo realizado em diversas áreas como: reciclagem de plástico, análise de poluentes do solo e do ar, estudo de amostras forenses, bactérias e fungos, pinturas a óleo, fontes de combustível e placas de circuito de computador (WAMPLER, 2007).

No quesito beneficiamento econômico, os carvões derivados da pirólise podem ser ativados, o que significa que podem ser submetidos a um processo químico (H_3PO_4 , $ZnCl_2$, KOH) ou físico (vapor) para maximizar suas propriedades adsorventes, desenvolvendo sua estrutura porosa (XU *et al.*, 2018; CARLSON; EBBENIS, 2022), transformando-os em carvões ativados.

Além disso, a pirólise vem sendo utilizada pelos governos de diversos países como uma alternativa de destinação final de seus resíduos, diminuindo o descarte em aterros sanitários e o uso de incineradores. Uma das vantagens do uso dessa tecnologia, quando comparada à incineração, é o fato de ter menor emissão de gases do efeito estufa, além de poder haver controle da separação das suas frações líquida e gasosa antes de poder utilizá-las como fonte de energia. Seu uso estende-se para tratamento de resíduos sólidos urbanos, resíduos de serviço de saúde, resíduos industriais, biomassa, pneus, dentre outros (REZAIYAN; CHEREMISINOFF, 2005).

2.3.2 Pirólise de resíduos têxteis

Miranda et al. (2007) realizou um estudo da pirólise de resíduos de algodão usados de uma fábrica de blusas e de algodão que passou por processo de branqueamento, para efeitos comparativos. Foi analisada a decomposição termogravimétrica em diferentes taxas de aquecimento de ambos tecidos, a fim de se entender qual a melhor taxa de aquecimento e temperatura para suas degradações. Depois realizou-se pirólise a 500°C e 700°C, a 20°C/min,

com 200g do resíduo em um reator com fluxo de 100mL/min de gás nitrogênio para avaliar as quantidades de gás, óleo e carvão geradas. Notou-se que em ambos houve perda de massa de mais de 74%, com produção maior de resíduos sólidos na menor temperatura de pirólise.

Teixeira (2019) realizou um estudo da pirólise em reator de leito fixo, sem passagem de gás inerte, de resíduos têxteis 100% viscose e 55% viscose/45% poliéster a fim de se obter carvão e óleo. Foram realizadas pirólises a 500°C e 700°C em tempos de 30 e 60 minutos, com massa média de 10g de cada tipo de resíduo, mostrando que o tecido misto produz mais carvão e o 100%, mais líquido, em ambas as temperaturas de pirólise avaliadas.

Já Yousef *et al.* (2019) realizou pirólise em escala piloto de tecido jeans nas colorações preto e azul, tendo como foco uma taxa de produção de óleo e gás acima de 80%, a qual foi alcançada quando a amostra de jeans azul foi submetida a temperatura de 800°C.

Além disso, pode-se observar também que há estudos que exploram as utilidades do carvão pirolítico, também conhecido como biochar, tanto em suas aplicabilidades energéticas quanto ambientais (LEE *et al.*, 2018), como na sua transformação em carvão ativado (Tabela 1).

Tabela 1 - Pirólises para formação de carvão ativado

Tecido têxtil	Massa do tecido (g)	Temperatura de pirólise (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	Tempo de pirólise (min)	Forma de ativação	Agente ativador	% carvão ativado gerado	Aplicação do carvão ativado gerado	Fonte
Linho	5	400, 500, 600, 700 e 800	-	60	Química	ZnCl ₂	29,4 - 39	Remoção de iodo e azul de metileno	[1]
Linho	50	450, 550 e 650	2	-	Química	H ₃ PO ₄	28,5 – 39,2	Caracterização do carvão gerado	[2]
Lã	13	350, 400, 450 e 500	10	-	Química	K ₂ CO ₃	19,73 – 48,01	Remoção de azul de metileno	[3]
Acrílico	8	700, 800 e 900	5	-	Física	Vapor d'água	-	Produção de carvão ativado com alto valor agregado	[4]

[1] CHEN *et al.*, 2019

[2] WILLIAMS; REED, 2004

[3] CHEN *et al.*, 2013

[4] NAHIL; WILLIAMS, 2012

Fonte: A autora, 2023.

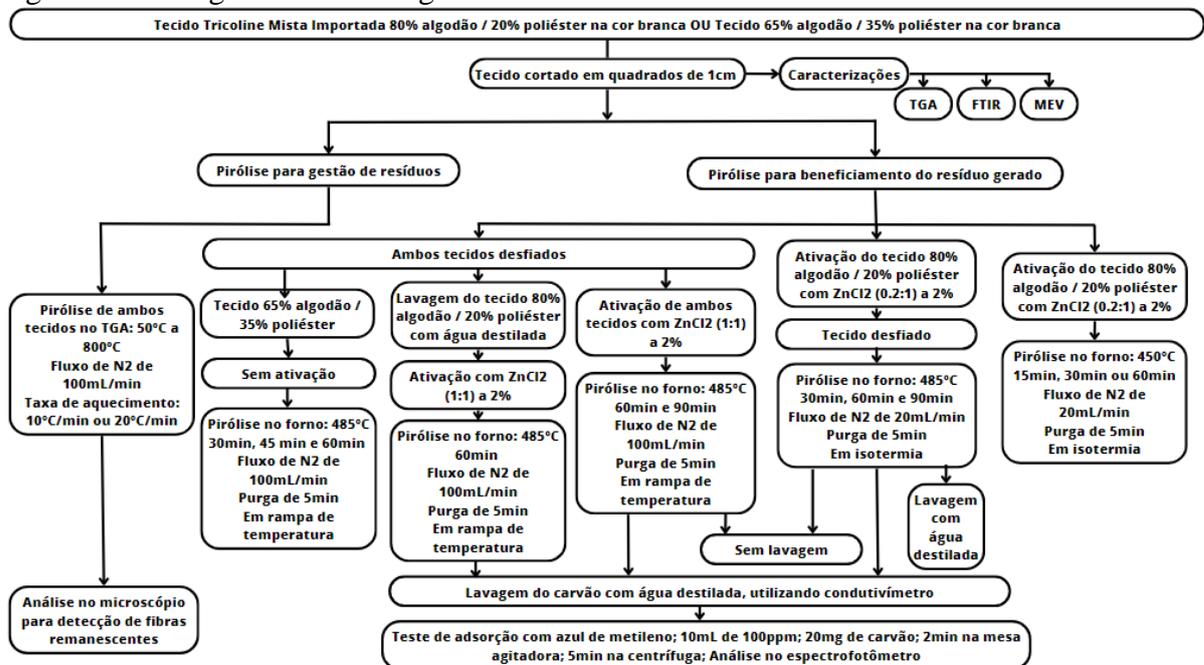
Na Tabela 1 observa-se que existem duas principais formas para ativação do tecido, para que o carvão gerado se torne ativo, que são a química e a física. Nota-se que as porcentagens de carvão ativado gerado apresentam variações consideráveis em cada tecido. Isso se deve pelos diferentes tipos de tecidos, influenciados pelas diferentes temperaturas e tempos avaliados, visto que quanto maior a temperatura e maior o tempo, há o favorecimento da geração de gases, quando há baixas temperaturas em longos tempos, ocorrem mais sólidos e quando ocorre o equilíbrio entre estes dois parâmetros, os líquidos são mais gerados (TEIXEIRA, 2019).

3 METODOLOGIA

3.1 Fluxograma metodológico

A Figura 1 apresenta todas as rotas metodológicas utilizadas nesta dissertação, de forma clara e objetiva, dividindo-as entre as duas abordagens utilizadas: Pirólise para gestão de resíduos e pirólise para beneficiamento do resíduo gerado.

Figura 1 - Fluxograma metodológico



Fonte: A autora, 2023.

3.2 Materiais

Para este estudo foram escolhidos tecidos com composição mista, algodão (fibra natural) e poliéster (fibra sintética), com duas variações de porcentagem: 80% algodão/20% poliéster e 65% algodão/35% poliéster, ambos da cor branca, a fim de evitar interferência de possíveis contaminantes provindos de corantes utilizados em tingimento de tecidos. O tecido

80% algodão/20% poliéster advém da Eurotêxtil e Ecotêxtil e o 65% algodão/35% poliéster da Disparada Tecidos.

Para além das vidrarias, equipamentos, água Milli-Q e água destilada utilizados nas análises, na Tabela 2 encontram-se discriminados os produtos e reagentes usados, bem como em qual foco de estudo e análise foram utilizados.

Tabela 2 – Reagentes e materiais de laboratório usados nos experimentos

Produto	Procedência	Foco de estudo	Análise em que foi utilizado
Cloreto de Zinco (ZnCl ₂)	Proquímios	Beneficiamento do resíduo gerado	Ativação do tecido
Carvão ativado comercial	-	Beneficiamento do resíduo gerado	Testes de adsorção
Azul de metileno	J. Prolab Indústria e Comércio de Produtos para Laboratório	Beneficiamento do resíduo gerado	Testes de adsorção e curva de calibração
Nitrogênio (N ₂)	Air Liquide	Beneficiamento do resíduo gerado	Pirólise
Hexano	Tedia	Beneficiamento do resíduo gerado	Lavagem do condensador do forno de pirólise em isotermita
Diclorometano	Supelco	Beneficiamento do resíduo gerado	Lavagem do condensador do forno de pirólise em isotermita
Papel de filtro	J. Prolab Indústria e Comércio de Produtos para Laboratório	Beneficiamento do resíduo gerado	Lavagem dos carvões
Lã de vidro	-	Beneficiamento do resíduo gerado	Teste de adsorção

Fonte: A autora, 2023.

Todos os equipamentos utilizados e as análises realizadas foram conduzidos no Instituto de Química da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), como descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Equipamentos e análises utilizados

Equipamento / análise	Marca / modelo	Foco do estudo	Em qual material foi utilizado	Laboratório
Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	Espectrômetro PerkinElmer FT-IR/FIR Frontier, nº de série: C 105496	Caracterização do tecido	Tecidos em estudo	Laboratório de Caracterização Instrumental I (Laboratório 408)
Análise Termogravimétrica (TGA)	TA Instruments, modelo Q50	Caracterização do tecido	Tecidos em estudo	Laboratório de Caracterização Instrumental I (Laboratório 408)
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	-	Caracterização do tecido	Tecidos em estudo	Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)
Espectrofotômetro	HACH DR 5000	Beneficiamento do resíduo gerado	Carvão ativado comercial e carvões produzidos pela pirólise dos tecidos em estudo	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)

Mesa Agitadora Incubadora de Bancada	CT 712	Beneficiamento do resíduo gerado	Carvão ativado comercial e carvões produzidos pela pirólise dos tecidos em estudo	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)
Multímetro	Hanna Instruments, modelo HI 2550 pH/ORP & EC/TDS/NaCl Meter	Beneficiamento do resíduo gerado	Carvão ativado comercial e carvões produzidos pela pirólise dos tecidos em estudo	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)
Estufa de Secagem com Circulação e Renovação de Ar	SolidSteel	Beneficiamento do resíduo gerado	Tecidos em estudo, carvão ativado comercial e resíduos produzidos pela pirólise dos tecidos em estudo	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)
Placa de agitação magnética e aquecimento	Corning, stirrer/hot plate	Beneficiamento do resíduo gerado	Tecidos em estudo, carvão ativado comercial e carvões produzidos pela pirólise dos tecidos em estudo	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)
Balança semi analítica	Marte, modelo AY220	Beneficiamento do resíduo gerado	Tecidos em estudo, carvão ativado comercial e carvões produzidos pela pirólise dos tecidos em estudo	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)
Balança semi analítica	Marte, modelo AD500	Beneficiamento do resíduo gerado	Tecidos em estudo, carvão ativado comercial e carvões produzidos pela pirólise dos tecidos em estudo	Laboratório 423
Balança analítica	Mettler Toledo, New Classic MS	Beneficiamento do resíduo gerado	Corante azul de metileno	Central Analítica Fernanda Coutinho (Laboratório 109)
Centrífuga	Excelsa II mod. 206 BL	Beneficiamento do resíduo gerado	Carvão ativado comercial e carvões produzidos pela pirólise dos tecidos em estudo	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)
Forno de pirólise de leito fixo vertical em isoterma	-	Beneficiamento do resíduo gerado	Tecidos em estudo	Laboratório 423
Forno de pirólise de leito fixo vertical com rampa de temperatura	-	Beneficiamento do resíduo gerado	Tecidos em estudo	Laboratório 423
Microscópio	Olympus BX60	Gestão de resíduos	Resíduos gerados pela pirólise no forno de TGA	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)
Microscópio	Olympus SZ61	Gestão de resíduos	Resíduos gerados pela pirólise no forno de TGA	Laboratório de Tecnologia Ambiental (Laboratório 304)

Fonte: A autora, 2023.

3.3 Caracterização dos tecidos

Os tecidos, antes de passarem pelo preparo para as pirólises, foram caracterizados de acordo com os itens 3.3.1, 3.3.2 e 3.3.3.

3.3.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para se avaliar os aspectos e morfologia dos tecidos, foi utilizada a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Cada tecido foi cortado em quadrados de 1cm separado em frações de 5g, transferido para um frasco e encaminhado para o Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto de Química da UERJ. O material foi separado e analisado pelo equipamento nas voltagens de aceleração de 5kV e 20kV.

3.3.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

Para avaliar a temperatura ideal para a pirólise, através da perda de massa dos tecidos, os mesmos foram submetidos à Análise Termogravimétrica (TGA). Cada tecido foi cortado em quadrados de 1cm, separado em frações de 5g, transferido para um frasco e encaminhado para o Laboratório de Caracterização Instrumental I do Instituto de Química da UERJ.

Cada amostra foi pesada no laboratório, contendo no mínimo 5mg cada. Após isso, cada amostra foi posta na panela de platina do equipamento e submetida ao aquecimento de 50°C a 800°C, em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100mL/min, com taxas de aquecimento de 10°C/min ou 20°C/min (de acordo com a finalidade da análise proposta) e padrões de calibração Alumel (154,2°C) e Níquel (354,4°C). A massa remanescente na panela é constantemente medida pela balança do equipamento ao longo do ensaio, que está em atmosfera de nitrogênio com fluxo de 40mL/min, obtendo-se, assim, os registros de percentual de perda de massa *versus* temperatura.

3.3.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Para a análise dos grupos funcionais presentes na estrutura dos tecidos, foi utilizada a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), pelo método de Reflexão Total Atenuada (ATR). Cada tecido foi cortado em quadrados de 1cm, separado em frações de 5g, transferido para um frasco e encaminhado para o Laboratório de Caracterização Instrumental I do Instituto de Química da UERJ.

Cada amostra foi pesada no laboratório, contendo no mínimo 15mg cada. Para a análise, utilizaram-se 8 acumulações, sendo retirado o ruído de fundo antes da análise das amostras. A faixa de leitura utilizada foi de 4000 cm^{-1} a 600 cm^{-1} .

3.4 **Pirólise para gestão de resíduos**

Visando a análise do comportamento do tecido em temperaturas maiores que as onde ocorre a degradação total, foram avaliados os resíduos gerados no forno TA Instruments, modelo Q50, utilizado na Análise Termogravimétrica (TGA). Visto que este apresenta condições semelhantes à pirólise de leito fixo, como relatado no item 3.3.2, o mesmo pôde ser utilizado para análise da redução de massa dos tecidos em estudo. A massa utilizada nessas análises, focadas apenas em analisar o resíduo final, foi de 20mg de tecido em cada procedimento.

Após serem realizados os procedimentos, retirava-se a panela de platina do equipamento com auxílio de uma pinça, apoiando-a sobre uma superfície plana. Utilizava-se uma espátula pequena para transferir o resíduo para uma lâmina de vidro, inserida em uma placa de petri, para posterior análise no microscópio. O forno, ao final da análise, providencia as massas inicial e final da amostra em estudo, não havendo necessidade de pesagem em balança analítica.

3.4.1 Análises no microscópio para averiguar presença de microplásticos

Para avaliação dos resíduos gerados pela pirólise realizada no TGA, foi realizada identificação visual, por meio do uso do Microscópio Olympus BX60 (Figura 2), a fim de se detectar possíveis fragmentos de fibras de tecido que possam vir a continuar intactas após serem submetidas a altas temperaturas. As imagens foram capturadas pelo celular modelo Samsung Galaxy S20 FE através da saída para câmera existente no microscópio. As fibras encontradas foram contadas manualmente e, para haver padronização, foi feita a estatística para a quantidade de fibras encontradas em 1kg de carvão. Essa metodologia foi baseada na utilizada por Flores-Ocampo e Armstrong-Altrin (2023).

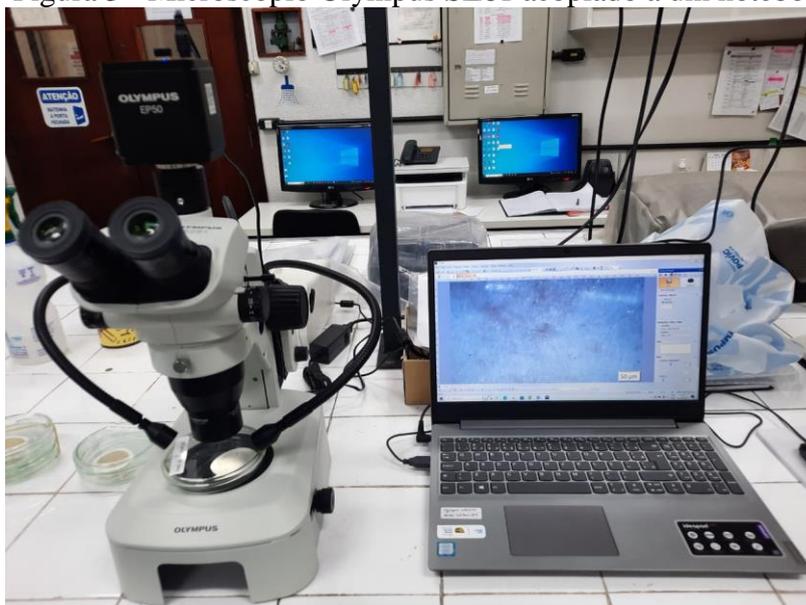
Após essa contagem, foi feita a medição dos tamanhos de alguns fragmentos de fibra encontrados nos resíduos, utilizando o Microscópio Olympus SZ61, acoplado a um notebook (Figura 3).

Figura 2 - Microscópio Olympus BX60



Fonte: LABTAM, 2023.

Figura 3 - Microscópio Olympus SZ61 acoplado a um notebook



Fonte: LABTAM, 2023.

3.5 Pirólise para beneficiamento do resíduo gerado

A fim de averiguar se os resíduos derivados da pirólise dos tecidos têxteis mistos pudessem ser reintroduzidos na cadeia produtiva, foram feitas análises para ativação química e ensaios de adsorção com o corante azul de metileno para verificação da possibilidade desse resíduo ser utilizado como adsorvente de poluentes orgânicos.

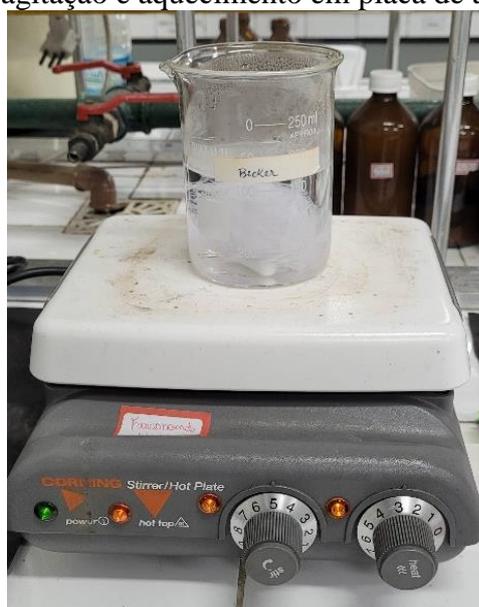
3.5.1 Preparo dos tecidos

Para a pirólise, os tecidos foram cortados em quadrados de 1cm (XU *et al.*, 2018) e também desfiados para serem pirolisados em forno de leito fixo.

3.5.1.1 Lavagem dos tecidos

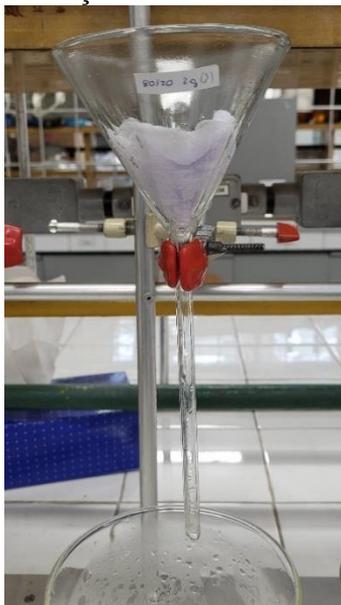
Em algumas amostras, os tecidos, antes de passarem pelo processo de ativação, foram lavados para remoção de impurezas que eles possam vir a ter. Para tal, foi utilizada e adaptada a metodologia de Zabihi et al. (2010), na qual imergiu-se o tecido em água destilada por 10 min, aquecendo-o e agitando-o em placa de agitação e aquecimento (Figura 4), filtrou-se em funil de vidro (Figura 5), depois lavou-se o tecido com água destilada em temperatura ambiente, até que a solução resultante mostrasse no condutivímetro um valor similar ao da condutividade da água destilada, demonstrando, assim, que o tecido estava livre de íons. Para essa metodologia, anotou-se a quantidade de água destilada utilizada, tanto quente quanto em temperatura ambiente até se estabilizar a condutividade. Após isso, o tecido foi seco na Estufa de Secagem com Circulação e Renovação de Ar da SolidSteel por 12h a 110°C.

Figura 4 - Tecido em agitação e aquecimento em placa de agitação e aquecimento



Fonte: A autora, 2022.

Figura 5 - Filtração do tecido em funil de vidro



Fonte: A autora, 2022.

3.5.1.2 Ativação química com $ZnCl_2$

Visando transformar o resíduo gerado em carvão ativado em busca de seu beneficiamento, utilizou-se a metodologia para ativação química, prévia à pirólise, com $ZnCl_2$ de Lucena (2014). Nesta metodologia, estabeleceu-se a razão de massa que se queria usar entre o tecido e o reagente (no caso dessa dissertação, é de 0.2:1 de massa de $ZnCl_2$: massa de tecido e de 1:1, no caso, 0,2g de massa de $ZnCl_2$ com 1g de massa de tecido e 1g de massa de $ZnCl_2$ com 1g de massa de tecido). Separou-se a massa de tecido desejado, fez-se uma solução de 2% de $ZnCl_2$, com água destilada, com a massa calculada desse reagente e submergiu-se o tecido nessa solução, sob agitação magnética, por 24h. Após essa agitação, o conjunto foi filtrado em funil de vidro e o tecido foi posto em estufa, a $110^\circ C$ por 12h para evaporação da água destilada. Feito isto, o tecido encontrava-se seco e poderia ser pirolisado.

3.5.2 Pirólise em fornos de leito fixo vertical

Para a pirólise foram utilizados dois fornos de leito fixo vertical, com passagem de gás nitrogênio, com características diferentes: um tendo reator com capacidade de até 1g de matéria-prima, atingindo a temperatura máxima de 450°C em isoterma e passagem de até 20mL/min de gás nitrogênio; o segundo, com reator com capacidade para até 10g de matéria-prima, atingindo temperatura máxima de 485°C em rampa de temperatura e passagem de gás nitrogênio controlado por um rotâmetro, podendo chegar a até 200mL/min.

3.5.2.1 Utilização do forno de leito fixo vertical em isoterma

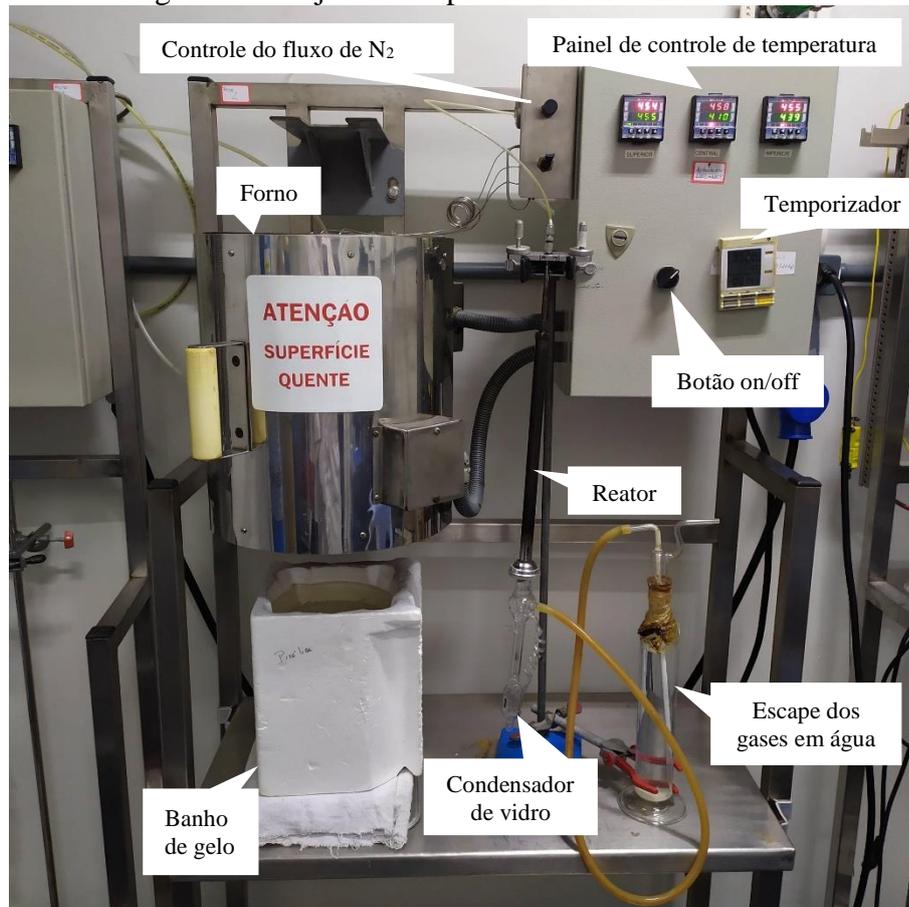
O forno em questão é um forno de leito fixo vertical que apresenta três painéis de controle dos termostatos superior, central e inferior (Figura 6), nos quais se insere a temperatura de residência, na qual se fará a pirólise em isoterma. Acoplado a ele encontram-se os dutos para fluxo de nitrogênio, que são conectados diretamente no sistema reator-condensador, que é inserido no forno ao se alcançar a temperatura desejada, permanecendo ali durante o tempo pré-estabelecido. O reator possui 1,4cm de diâmetro e 32cm de comprimento, com capacidade máxima de pirolisar 1g de tecido em estado seco. Durante a pirólise, o reator permanece dentro do forno, pois encontra-se com a matéria-prima dentro dele a ser pirolisada, e o condensador, feito de vidro, permanece abaixo do forno, imerso em banho de gelo. Antes e depois da pirólise, quando resfriados, tanto reator quanto condensador são pesados para se calcular a quantidade de sólido e líquido formados e, conseqüentemente, de gases também. Todo o sistema montado, antes de ser inserido no forno, encontra-se apresentado na Figura 7. Ressalta-se que, durante a pirólise, ao condensador é conectada uma mangueira para escape dos gases, que se dá em água, tendo a capela e o ar condicionado sempre ligados durante todo o procedimento.

Figura 6 - Painel de controle de temperatura do forno em isoterma



Fonte: A autora, 2022.

Figura 7 - Conjunto completo do forno em isoterma



Fonte: A autora, 2022.

3.5.2.2 Utilização do forno de leito fixo vertical com rampa de temperatura

O forno em questão é um forno de leito fixo vertical que apresenta o mesmo painel de controle do forno anterior (Figura 6), porém neste utiliza-se rampa de temperatura ao invés de isoterma ao se aquecer a amostra. No painel de controle há a possibilidade de se programar a taxa de aquecimento do forno até a temperatura desejada. O reator é maior (Figura 8), tendo 2,1cm de diâmetro e 78,8cm de comprimento, armazenando até 10g de matéria-prima a ser pirolisada, e o condensador, ao invés de ser de vidro, é de metal. O reator é acoplado ao forno antes do mesmo ser aquecido, e o fluxo de gás apresenta um rotâmetro (Figura 9), possibilitando um maior controle do fluxo de nitrogênio no sistema, o qual se conecta na lateral superior do reator. O escape dos gases se dá em água e, tanto a capela, quanto o ar condicionado permanecem ligados durante todo o processo de pirólise, visando o não escape desses gases para a atmosfera. A Figura 10 apresenta o forno com o sistema reator-condensador acoplados a

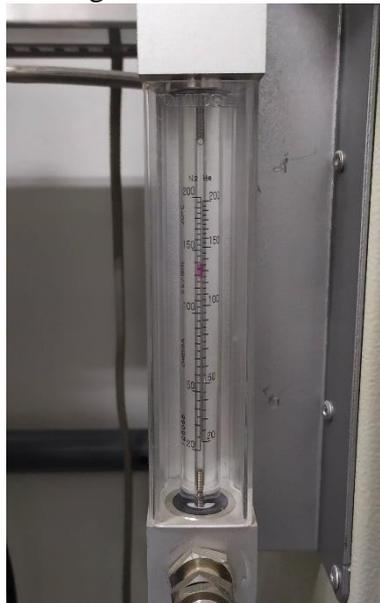
ele. Visto as dimensões do reator, não é possível pesá-lo como é feito com o reator do forno em isoterma.

Figura 8 - Reator do forno com rampa de temperatura



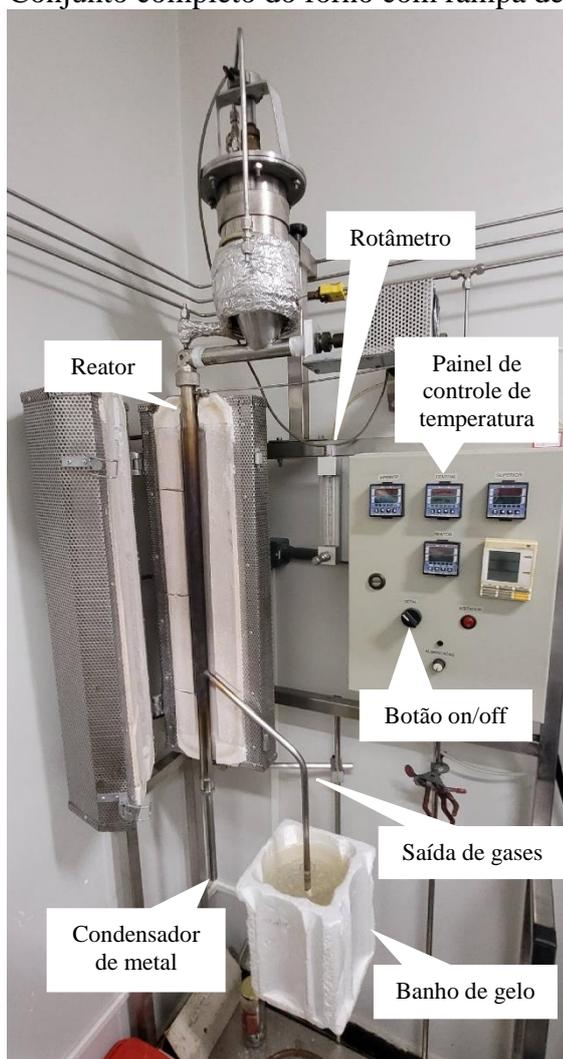
Fonte: A autora, 2022.

Figura 9 - Rotâmetro



Fonte: A autora, 2022.

Figura 10 - Conjunto completo do forno com rampa de temperatura



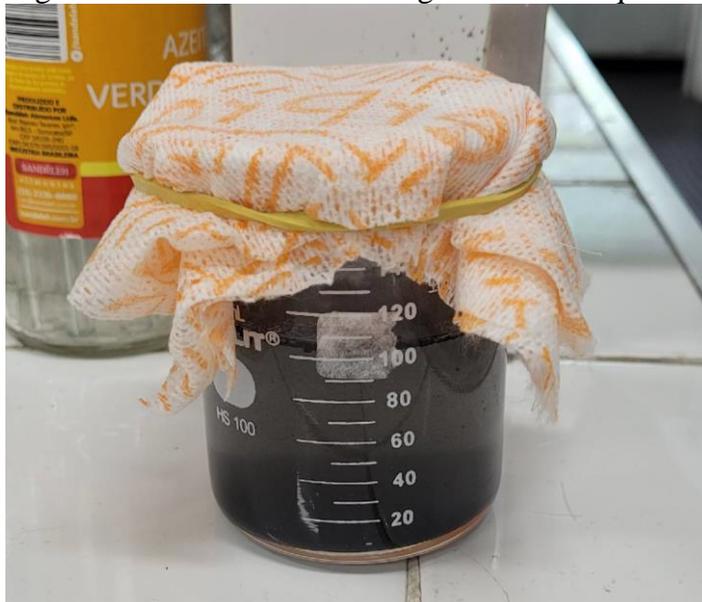
Fonte: A autora, 2022.

3.5.3 Lavagem dos carvões gerados

O carvão formado, antes de ser caracterizado e testado, precisou ser lavado para que o $ZnCl_2$ utilizado para ativá-lo fosse removido, além de remover outras impurezas que ele pudesse vir a ter. Para tal, foi utilizada e adaptada a metodologia de Zabihi et al. (2010), assim como a utilizada no item 3.5.1.1, na qual imergiu-se o carvão em água destilada quente por 10min em bquer tampado por pano (Figura 11), filtrou-se em papel de filtro em funil de vidro (Figura 12), depois lavou-se o carvão com água destilada em temperatura ambiente, até que a solução resultante mostrasse no condutímetro um valor similar ao da condutividade da água destilada, demonstrando, assim, que os íons foram removidos do carvão. Para essa metodologia, anotou-

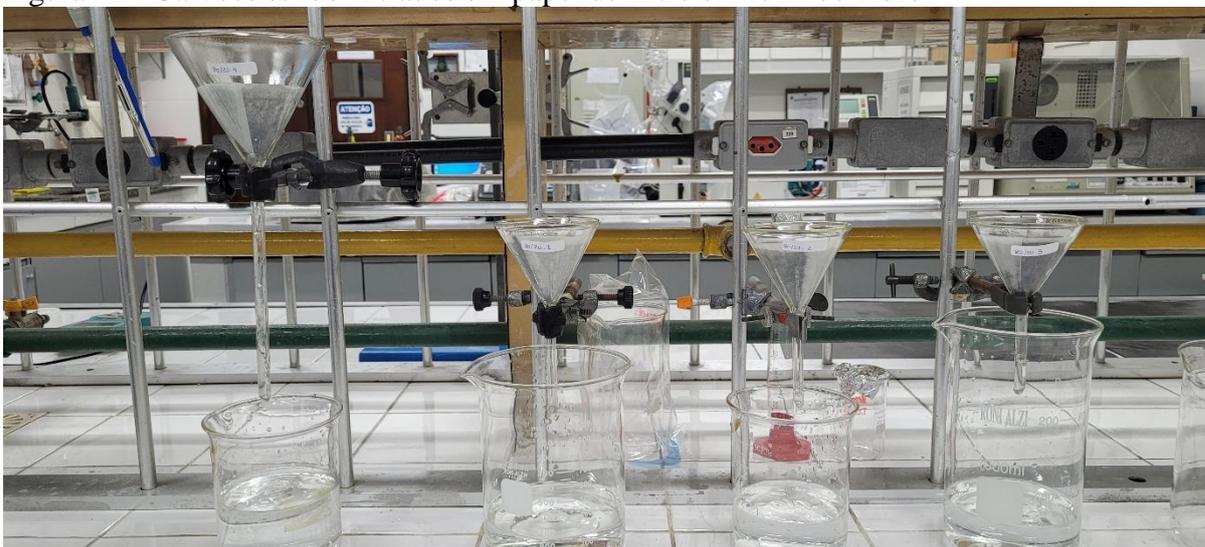
se a quantidade de água destilada utilizada, tanto quente quanto em temperatura ambiente até se estabilizar a condutividade. Após isso, o tecido foi seco na Estufa de Secagem com Circulação e Renovação de Ar da SolidSteel por 12h a 110°C.

Figura 11 - Carvão imerso em água destilada aquecida



Fonte: A autora, 2022.

Figura 12 - Carvões sendo filtrados em papel de filtro em funil de vidro



Fonte: A autora, 2022.

3.5.4 Ensaio de adsorção

Os testes de adsorção foram feitos com o corante azul de metileno, visto que é frequentemente investigado graças à sua forte adsorção em compostos sólidos, fazendo dele um modelo para estudos de adsorção de contaminantes orgânicos em soluções aquosas (LIMA *et al.*, 2020).

Com o intuito de se obter uma curva de calibração para a absorvância e concentrações de azul de metileno, utilizou-se o Espectrofotômetro de modelo HACH DR 5000 e a balança analítica Mettler Toledo, New Classic MS para pesagem do corante. Essa curva auxilia na verificação da concentração das amostras através da medição da absorção e transmissão de luz que passa pela mesma (KASVI, 2016).

A avaliação da capacidade da absorvância do corante azul de metileno foi feita em soluções aquosas de concentrações de 5, 10, 15 e 20 mg/L, realizadas cinco vezes cada uma, no espectrofotômetro de modelo HACH DR 5000 no comprimento de onda de 665nm (MAIA *et al.*, 2021). Primeiro foi feita uma solução mãe de 100mg/L em um balão volumétrico de 100mL e, a partir dela, foram extraídas as outras concentrações em balões volumétricos de 20mL cada, para fazer as análises. Após as análises, as soluções resultantes foram armazenadas em recipientes âmbar, em local arejado em temperatura ambiente, para preservação das mesmas. Esse experimento foi repetido até que se atingisse uma curva satisfatória com $R^2=0,99$.

3.5.4.1 Testes de adsorção com azul de metileno

Foram feitos testes de adsorção cinético e de equilíbrio, tanto com o carvão ativado comercial (CAC), quanto com os resíduos resultantes das pirólises dos tecidos em estudo.

Nos testes de adsorção realizados nos resíduos gerados através da pirólise e no CAC, foram utilizados o Espectrofotômetro de modelo HACH DR 5000, a Mesa Agitadora Incubadora de Bancada – CT 712 e a Centrífuga Excelsa II mod. 206 BL.

O teste de adsorção cinético foi adaptado de Maia *et al.* (2021), sendo realizado apenas com o CAC, seguindo as seguintes etapas: foram utilizados 15 tubos falcon com 20mg do CAC e 10mL de solução de 25mg/L de azul de metileno em cada; os tubos foram enumerados em sequência numérica (1, 2 e 3), visto que foram feitos em triplicata, e depois em função do seu

respectivo tempo (ex: 1.1 – teste 1 tempo 1 (5min), 1.2 - teste 1 tempo 2 (10min)), sendo os tempos utilizados: 5min, 10min, 15min, 20min e 25min na mesa agitadora incubadora de bancada – CT 712 a 200rpm a 25°C. Depois da mesa agitadora, os tubos foram postos na centrífuga excelsa II mod. 206 BL, a 3000 rpm, 70 rpm/s² por 45min; após isso, o sobrenadante de cada solução foi analisado no espectrofotômetro de modelo HACH DR 5000 no comprimento de onda de 665nm. Entretanto, a fim de se otimizar o tempo nos equipamentos, adaptou-se a metodologia para a descrita a seguir.

O teste de adsorção de equilíbrio foi adaptado de Maia et al. (2021), sendo realizado tanto com o CAC, quanto com o resíduo das pirólises, seguindo as seguintes etapas: foram utilizados 3 tubos falcon com 20mg de resíduo/CAC e 10mL de solução de 100mg/L de azul de metileno em cada, enumerados de 1 a 3; os tubos foram dispostos na mesa agitadora incubadora de bancada – CT 712 a 200rpm a 25°C por 2min; após, foram inseridos na centrífuga excelsa II mod. 206 BL, a 3000 rpm, 50 rpm/s² por 5min. Para se retirar o resíduo que permanecia no sobrenadante, utilizou-se lã de vidro para filtrá-lo, a fim de se obter apenas o líquido para ser analisado no espectrofotômetro. Entretanto, notou-se que a lã de vidro absorvia o azul de metileno, logo, adaptou-se a metodologia para que a captação do sobrenadante fosse realizada com pipeta pasteur de vidro. Feito isso, o sobrenadante foi retirado com pipeta pasteur de vidro para ser analisado no espectrofotômetro de modelo HACH DR 5000 no comprimento de onda de 665nm, a fim dos dados resultantes serem plotados na curva de calibração previamente feita para se averiguar a concentração final das amostras. Este experimento foi repetido até que o ajuste da posição de melhor aderência de contato, de forma uniforme, entre resíduo/CAC e azul de metileno, fosse encontrada na mesa agitadora, sendo essa a que os tubos se encontram levemente inclinados.

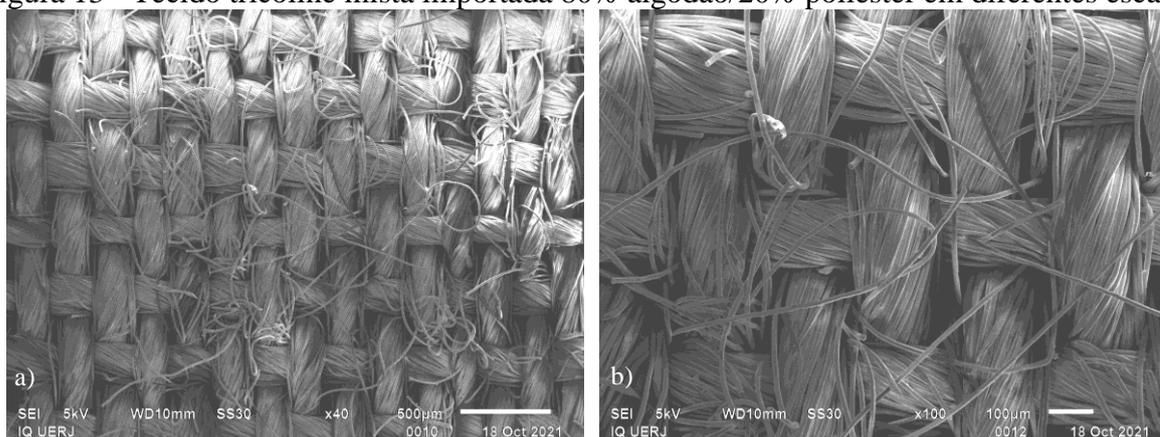
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do tecido

4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

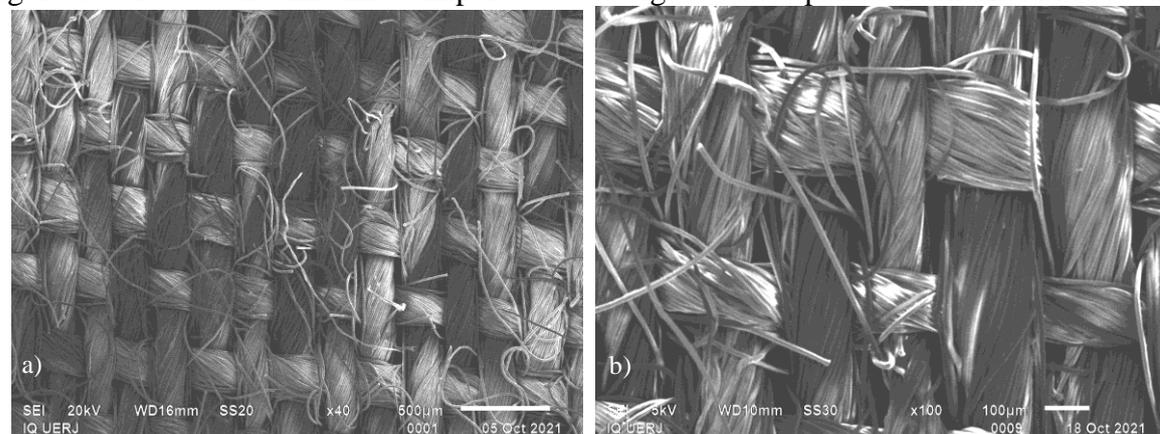
A Figura 13 apresenta as imagens retiradas do tecido tricoline mista importada de cor branca 80% algodão/20% poliéster, e a Figura 14, as imagens do tecido tricoline mista importada de cor branca 65% algodão/35% poliéster.

Figura 13 - Tecido tricoline mista importada 80% algodão/20% poliéster em diferentes escalas



Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, 2021.

Figura 14 - Tecido tricoline mista importada 65% algodão/35% poliéster em diferentes escalas



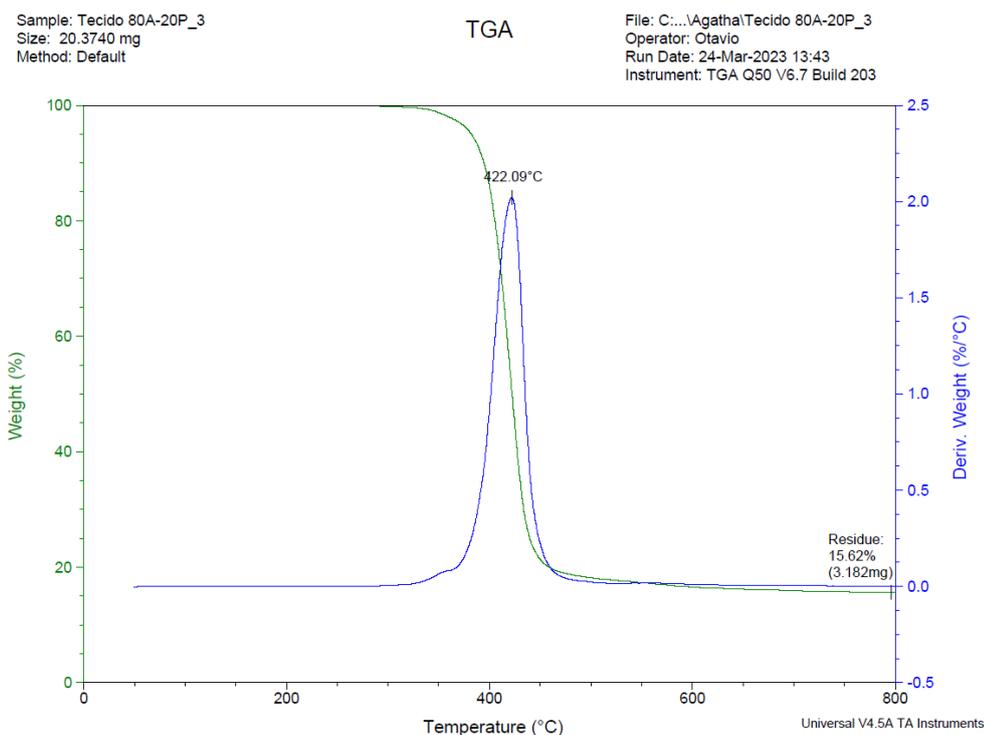
Fonte: Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, 2021.

Nota-se que a trama dos dois tecidos é similar, porém percebe-se que a trama do tecido 80% algodão/20% poliéster é mais organizada e arrumada, enquanto a do tecido 65% algodão/35% poliéster mostra-se mais desalinhada e desorganizada.

4.1.2 Análise Termogravimétrica (TGA)

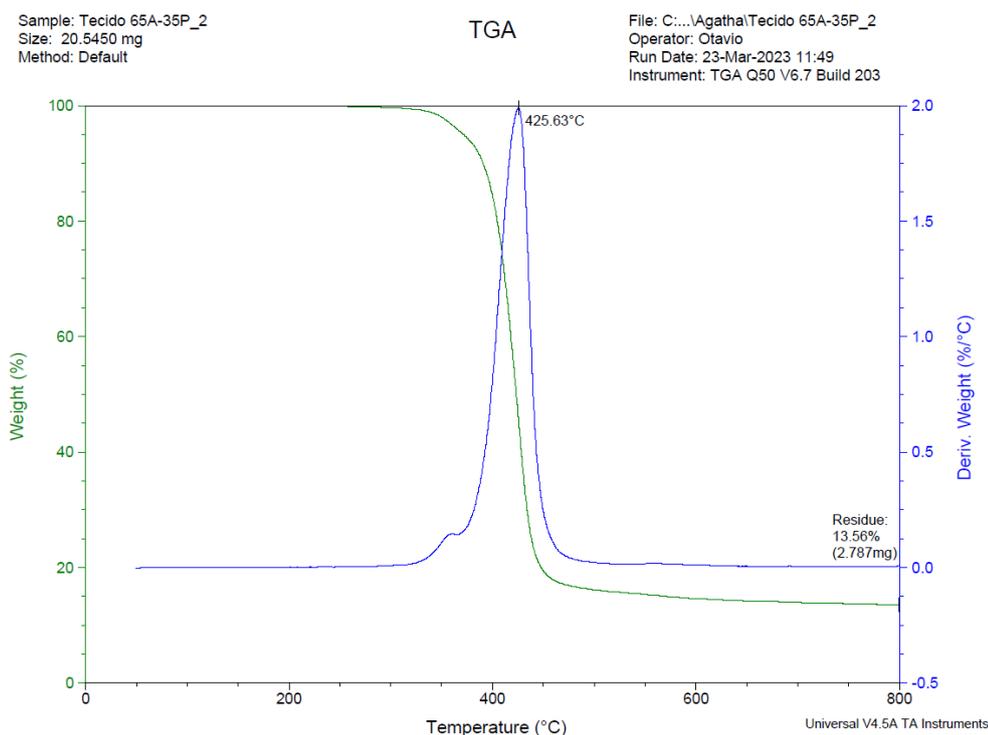
A análise termogravimétrica (TGA) do tecido 80% algodão/20% poliéster encontra-se na Figura 15 e o do tecido 65% algodão/35% poliéster encontra-se na Figura 16.

Figura 15 - TGA do tecido 80% algodão / 20% poliéster



Fonte: Laboratório de Caracterização Instrumental I, 2023.

Figura 16 - TGA do tecido 65% algodão / 35% poliéster



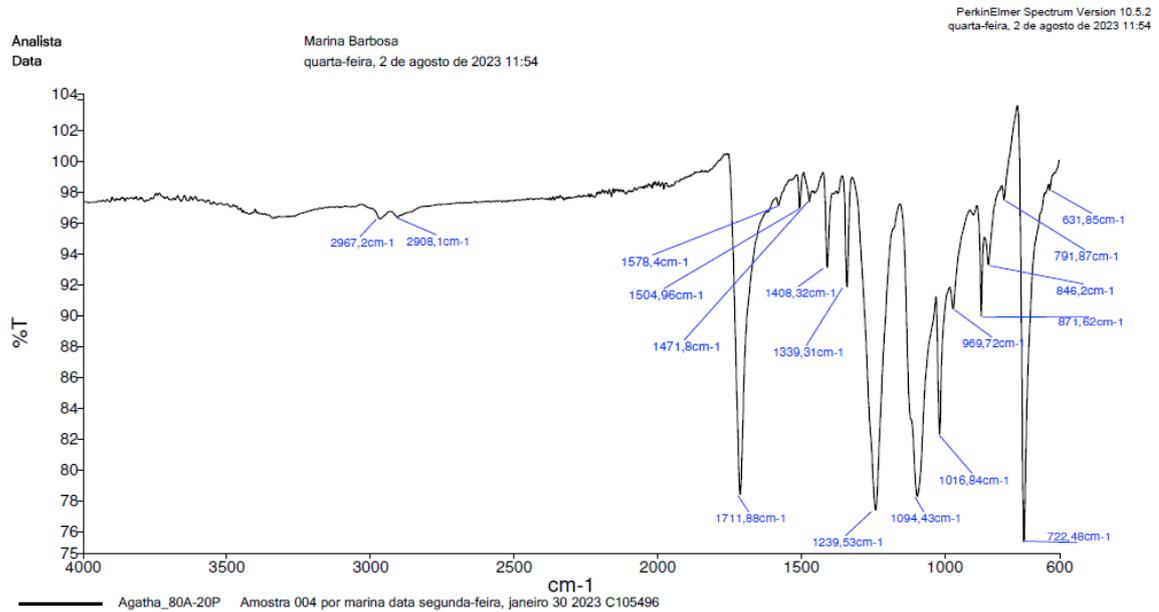
Fonte: Laboratório de Caracterização Instrumental I, 2023.

Em ambos os tecidos se nota que a temperatura de degradação é similar, sendo de 422,09°C para o tecido 80% algodão/20% poliéster e de 425,63°C para o tecido 65% algodão/35% poliéster. O primeiro tecido apresenta maior taxa de resíduo, com 15,62%, em comparação aos 13,56% do segundo tecido. Isso mostra que a variação de composição das fibras, em ambos os tecidos, não altera significativamente a temperatura de degradação, nem a porcentagem final de resíduos pirolisados, em ambiente controlado.

4.1.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

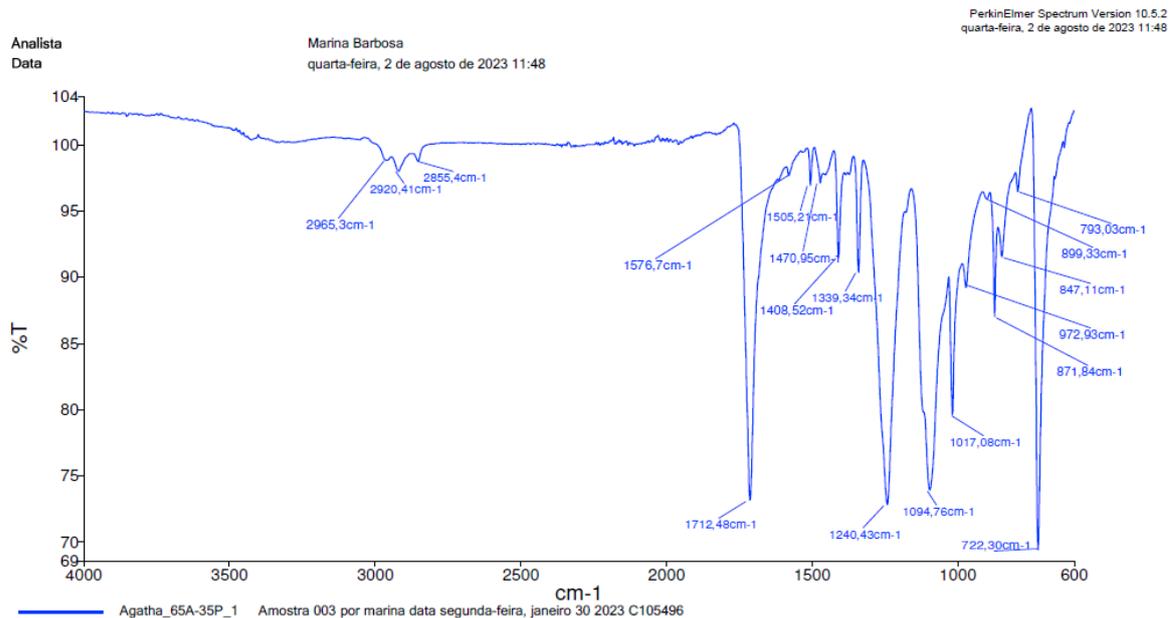
Essa análise realizada no tecido visa confirmar, por meio das estruturas químicas encontradas, se o tecido realmente é composto por algodão e poliéster. A Figura 17 mostra os grupos encontrados no tecido 80% algodão/20% poliéster e a Figura 18, os grupos encontrados no tecido 65% algodão/35% poliéster.

Figura 17 - FTIR do tecido 80% algodão/20% poliéster



Fonte: Laboratório de Caracterização Instrumental I, 2023.

Figura 18 - FTIR do tecido 65% algodão/35% poliéster

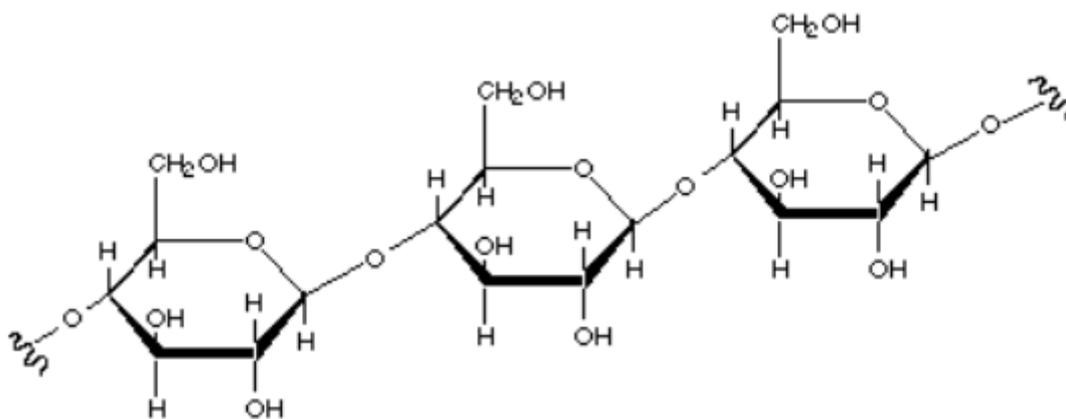


Fonte: Laboratório de Caracterização Instrumental I, 2023.

As Figuras 17 e 18 mostram os espectros de FTIR dos tecidos estudados, contendo algodão e poliéster. O algodão é formado majoritariamente por celulose ($C_6H_{10}O_5$)_n (COUTINHO, 2018), que é um polímero de glicose (MORAES, 2022) (Figura 19) e o poliéster utilizado para fibras têxteis é o PET (politereftalato de etileno), um polímero sintético originado a partir da interação de poliálcoois e poliácidos carboxílicos (Figura 20) (DIAS, 2023).

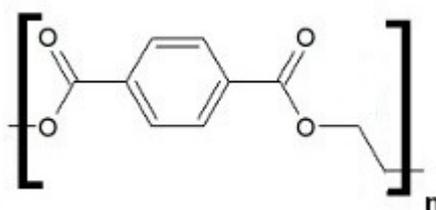
Com base na estrutura química destes materiais, as bandas de absorção correspondentes aos grupos funcionais destes materiais encontradas nas Figuras 17 e 18 demonstram que os tecidos em estudo são derivados dos mesmos. As bandas encontradas foram: na região de 2900 cm^{-1} são observadas as bandas atribuídas à vibração de estiramento assimétrico do grupo CH_2 e a banda em torno de 2850 cm^{-1} , atribuído à vibração de estiramento simétrico do grupo CH_2 ; a banda intensa na região de 1700 cm^{-1} é característica do estiramento do grupo $\text{C}=\text{O}$; a região de $1460 - 1360\text{ cm}^{-1}$ apresenta banda em torno de 1473 cm^{-1} que é atribuída à vibração de deformação angular do grupo CH_2 ; a banda na região em torno de 1240 cm^{-1} é atribuída ao estiramento da ligação entre carbono e oxigênio ($\text{C}-\text{O}$) ligado à carbonila do poliéster, a banda na região em torno de 1094 cm^{-1} é atribuída ao estiramento da ligação $\text{C}-\text{O}$ de álcool secundário do algodão; a banda na região em torno de 1017 cm^{-1} é atribuída ao estiramento da ligação $\text{C}-\text{O}$ de álcool primário do poliéster; por fim, a região de $730-720\text{ cm}^{-1}$ apresenta uma banda em torno de 719 cm^{-1} , que é atribuída à vibração de deformação angular fora do plano do grupo CH_2 .

Figura 19 - Fórmula estrutural da celulose



Fonte: MORAES, 2022.

Figura 20 - Fórmula estrutural do poliéster (PET)



Fonte: DIAS, 2023.

4.2 Pirólise para eficiência na gestão de resíduos

Visando avaliação da pirólise na redução de massa de resíduos têxteis para melhor gestão dos mesmos, foram realizadas pirólises no TGA, pois o equipamento utilizado oferece um ambiente controlado para uma melhor avaliação do comportamento do resíduo têxtil estudado.

Primeiro foi realizada a pirólise em forno de TGA (Tabela 4), onde o tecido foi posto na panela de platina dentro do forno em quadrados de 1cm, em estado seco, com temperatura inicial de 50°C e final de 800°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min e fluxo de nitrogênio de 100 mL/min. Pela temperatura de degradação ser menor que 800°C em ambos os tecidos, realizar a pirólise nesta temperatura não interfere nos produtos gerados.

Tabela 4 - Dados da pirólise em TGA

Nº	Tecido	Massa inicial de tecido (mg)	Massa final de resíduo (mg)	% de líquido + gás	% de resíduo	Média	Desvio padrão
1	80% algodão / 20% poliéster	20,29	3,039	85,03	14,97	15,08	0,50
2	80% algodão / 20% poliéster	20,09	2,945	85,34	14,66		
3	80% algodão / 20% poliéster	20,37	3,182	84,38	15,62		
4	65% algodão / 35% poliéster	20,54	2,787	86,43	13,57	13,83	0,37
5	65% algodão / 35% poliéster	20,24	2,766	86,34	13,66		
6	65% algodão / 35% poliéster	20,64	2,944	85,74	14,26		

Fonte: A autora, 2023.

Percebe-se que as porcentagens de resíduos coincidem com as projetadas pelos gráficos da análise termogravimétrica realizada em ambos os tecidos (Figuras 15 e 16), tendo o tecido 80% algodão/20% poliéster apresentado maior taxa de resíduos gerados, ao ser comparado com o outro tecido.

Ao se analisar essas porcentagens, nota-se que a pirólise é uma grande aliada na gestão e manejo de resíduos têxteis mistos de algodão com poliéster, visto há redução de mais de 84% de sua massa em todas as pirólises realizadas.

Na Tabela 5 estão apresentados diferentes tipos de tecidos que passaram pelo processo da pirólise de forma semelhante ao realizado neste trabalho, utilizando o nitrogênio como gás de arraste, em um processo de fluxo contínuo em temperaturas elevadas, em forno de leito fixo.

Tabela 5 - Comparação de geração dos produtos da pirólise entre tecidos têxteis

Nº	Tecido têxtil	Condições da pirólise		Rendimento		Fonte
		Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento (°C/min)	% líquido + gás	% resíduo	
1	Resíduos de fibras naturais	350-900	2	67,5 - 80	20 - 32,5	(WILLIAMS; REED, 2003)
2	Resíduos de tecido acrílico	500-900	5	42 - 51	49 - 57	(NAHIL; WILLIAMS, 2010)
3	Resíduos de jeans preto	800	20	81,6	18,4	(YOUSEF <i>et al.</i> , 2019)
4	Resíduos de jeans azul	800	20	82,8	17,2	(YOUSEF <i>et al.</i> , 2019)
5	Pano à base de algodão	300-900	10	25-83	17-75	(CHOWDHURY ; SARKAR, 2012)
6	Tecido misto de algodão com poliéster (80% algodão / 20% poliéster)	800	10	84,9	15,1	Este trabalho
7	Tecido misto de algodão com poliéster (65% algodão / 35% poliéster)	800	10	86,2	13,8	Este trabalho

Fonte: Adaptada de Lee et al. (2023).

Percebe-se que os tecidos em estudo apresentam as maiores reduções de massa quando comparados a tecidos com outras composições, sejam eles sintéticos ou naturais. Vale ressaltar que os tecidos 3 e 4 também apresentam tramas com tecidos mistos, mostrando uma redução semelhante à dos tecidos em estudo. Nota-se que o tecido que apresenta melhor redução de massa é o tecido em estudo que contém maior porcentagem de poliéster (35% poliéster), mostrando que uma maior porcentagem de tecido sintético em tramas mistas apresenta melhor performance na pirólise, quando comparado a tecidos puros, quando o foco é a redução de massa da matéria prima em estudo.

4.2.1 Análises no microscópio

Ao serem analisados em microscópio, os resíduos da pirólise dos tecidos em estudo apresentaram fragmentos de fibras junto com as partes carbonizadas e estes foram contabilizados de forma manual, como mostrado na Tabela 6.

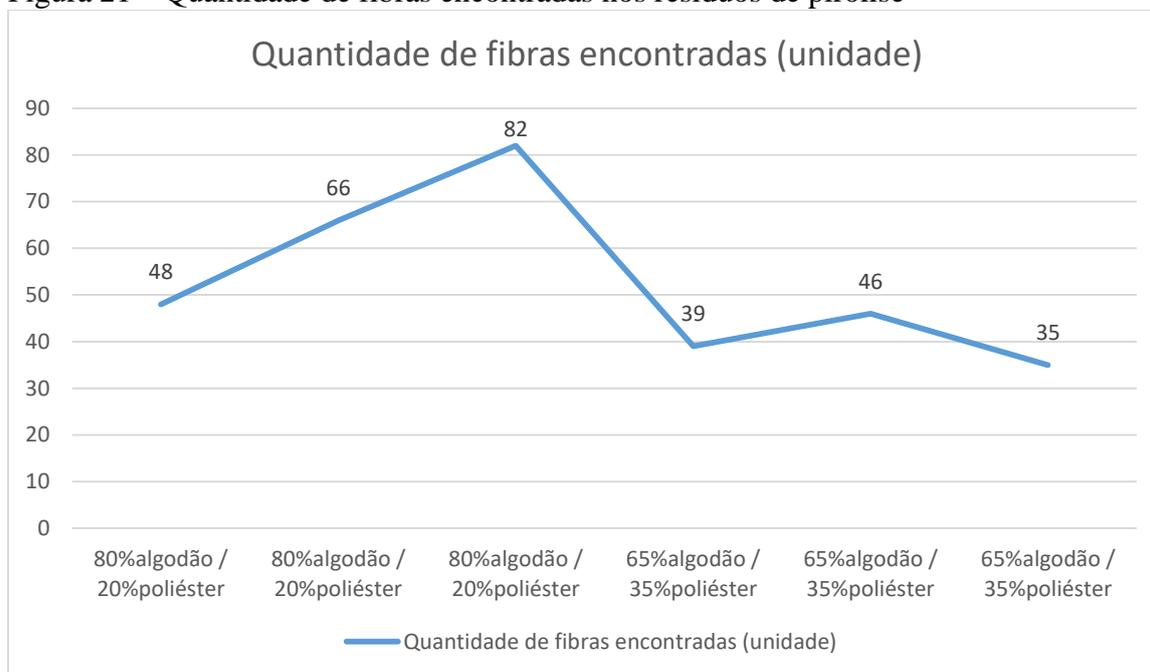
Tabela 6 - Quantidade de fibras de tecido encontradas nas pirólises feitas em TGA

Nº	Tecido	Massa inicial de tecido (mg)	Massa final de resíduo (mg)	% de resíduo	Quantidade de fibras encontradas (unidade)	Quantidade de fibras por 1kg de carvão (10 ⁶)
1	80%algodão / 20%poliéster	20,29	3,039	14,97	48	15,79
2	80%algodão / 20%poliéster	20,09	2,945	14,66	66	22,41
3	80%algodão / 20%poliéster	20,37	3,182	15,62	82	25,77
4	65%algodão / 35%poliéster	20,54	2,787	13,57	39	13,99
5	65%algodão / 35%poliéster	20,24	2,766	13,66	46	16,63
6	65%algodão / 35%poliéster	20,64	2,944	14,26	35	11,89

Fonte: A autora, 2023.

Os dados sobre as quantidades de fibras encontradas em cada resíduo de pirólise mostrado na Tabela 6 encontram-se explicitados na Figura 21.

Figura 21 – Quantidade de fibras encontradas nos resíduos de pirólise



Nota-se que, de modo geral, no tecido 80% algodão/20% poliéster ocorre menor redução de massa do tecido carbonizado, o que impactou diretamente no aumento de aparição de fibras intactas no resíduo gerado. Nesta mesma tabela foi feita uma comparação da possível quantidade de fibras que poderia ser encontrada em 1kg de resíduo gerado pela pirólise dos tecidos, baseando-se na quantidade já observada. Observa-se que as quantidades variam desde 11,89 milhões chegando até a 25,77 milhões de fibras.

Esses dados reforçam a necessidade de se haver um descarte correto de resíduos, seja dos tecidos puros ou dos resíduos gerados pela pirólise destes, para reduzir os riscos de contaminação do ar, solo e água por microplásticos.

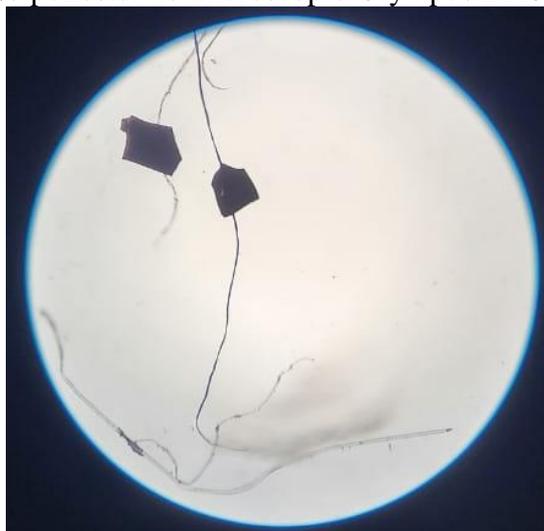
As Figuras 22 e 23 mostram algumas fibras encontradas em resíduos de pirólise apresentados na Tabela 6, através do uso do Microscópio Olympus BX60.

Figura 22 – Imagens das fibras de tecido encontradas no resíduo pirolisado do tecido 80% algodão / 20% poliéster no microscópio Olympus BX60 – Zoom 50x



Fonte: A autora, 2023.

Figura 23 – Imagens das fibras de tecido encontradas no resíduo pirolisado do tecido 65% algodão / 35% poliéster no microscópio Olympus BX60 – Zoom 50x



Fonte: A autora, 2023.

Nota-se que as fibras encontradas possuem características distintas. Na Figura 22 se apresentam próximas e em grande quantidade, mantendo a cor original da fibra do tecido, que

é branca, mostrando que não houve queima desse tecido. Já na Figura 23, as fibras mostram-se inseridas em pedaços carbonizados, apresentando coloração escura, indicando que apenas iniciaram o processo, não chegando a completa-lo. As manchas pretas que aparecem em ambas as imagens são fragmentos de tecidos completamente carbonizados, mostrando que em ambas houve carbonização parcial. Ambas situações apresentadas nas figuras acima foram identificadas em todos os resíduos avaliados no microscópio.

Visando avaliar o comprimento das fibras encontradas, foi utilizado o Microscópio Olympus SZ61. As Figuras 24 e 25 mostram imagens de fibras encontradas em amostras de resíduos de pirólise da Tabela 6, analisadas de forma aleatória, com intuito de se medir o tamanho das fibras de modo geral.

Figura 24 – Imagem de fibra de tecido encontrada em resíduo pirolisado do tecido 65% algodão / 35% poliéster no microscópio Olympus SZ61 - Zoom 40x



Fonte: A autora, 2023.

Figura 25 - Imagem de fibra de tecido encontrada em resíduo pirolisado do tecido 80% algodão / 20% poliéster no microscópio Olympus SZ61 - Zoom 180x



Fonte: A autora, 2023.

Na Figura 24 nota-se que a queima não é homogênea em todo o tecido, o que se deve ao fato do tecido ser misto entre uma fibra natural e uma sintética. Já na Figura 25, sugere-se que o tecido sintético enrugou e se fixou ao redor do algodão (ROCHA, 2014), visto que a imagem mostra uma fibra intacta com pontos carbonizados ao seu redor.

Percebe-se que as fibras encontradas apresentam tamanhos na escala do micrômetro (μm), que equivale a um milionésimo de metro ($1 \times 10^{-6}\text{m}$). Essas fibras, por serem derivadas de material parcialmente sintético, podem ser consideradas microplásticos, tanto pela sua composição, quanto pelo comprimento, visto que microplásticos são polímeros que apresentam comprimento total entre $1 \mu\text{m}$ e 5mm (CAIXETA *et al.*, 2022).

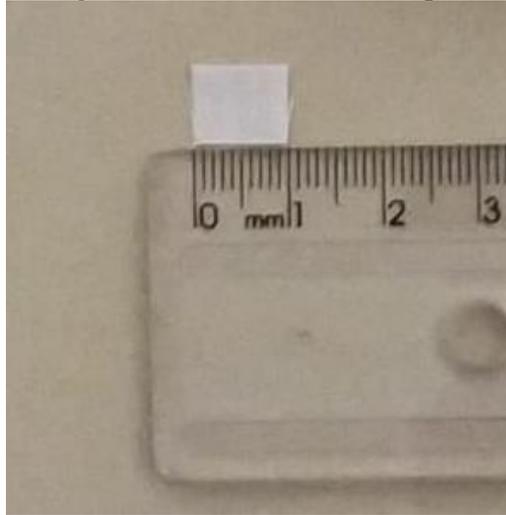
4.3 Pirólise para beneficiamento do resíduo gerado

Após verificar que a pirólise é uma forma de tratamento eficaz para a redução de massa dos resíduos têxteis mistos de algodão com poliéster, foram realizadas análises para um possível beneficiamento do resíduo gerado, visto que, por conter microplásticos, o descarte incorreto do mesmo pode causar danos ambientais.

4.3.1 Preparo dos tecidos

Antes de ser realizada a pirólise, os tecidos foram cortados em quadrados de 1cm (Figura 26), porém percebeu-se, ao longo de tentativas de pirólise, que o tecido não carbonizava por completo (Figura 27) sendo necessário desfiá-lo (Figura 28) para aumentar a superfície de contato, facilitando assim sua completa carbonização (Figura 29). A Figura 30 apresenta a diferença entre o tecido cortado em quadrados de 1cm e o fio.

Figura 26 – Imagem do tecido cortado em quadrados de 1cm



Fonte: A autora, 2022.

Figura 27 – Imagem do tecido pirolisado não carbonizado por completo



Fonte: A autora, 2022.

Figura 28 – Imagem do tecido desfiado



Fonte: A autora, 2022.

Figura 29 – Imagem do resíduo do tecido pirolisado completamente carbonizado



Fonte: A autora, 2022.

Figura 30 – Imagem do tecido cortado em quadrado de 1cm e desfiado



Fonte: A autora, 2022.

Para passar pelo processo de pirólise em forno de leito fixo, seja visando gerar resíduo quimicamente ativado ou não, foram feitos diferentes preparos com o tecido, como mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados dos preparos dos tecidos para a pirólise

Nº	Tecido	Forma do tecido	Ativação química	Forma de secagem do tecido	Estado do tecido para a pirólise
1	80/20*	Quadrados de 1cm	-	-	Seco
2	80/20*	Quadrados de 1cm	-	-	Embebido em água Milli-Q
3	80/20*	Quadrados de 1cm	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
4	80/20*	Quadrados de 1cm	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
5	80/20*	Quadrados de 1cm	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
6	80/20*	Quadrados de 1cm	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
7	80/20*	Quadrados de 1cm	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
8	80/20*	Quadrados de 1cm	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
9	80/20*	Quadrados de 1cm	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
10	80/20*	Desfiado pós ativação	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
11	80/20*	Desfiado pós ativação	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
12	80/20*	Desfiado pós ativação	ZnCl ₂ (1:0.2) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
13	80/20*	Desfiado antes da ativação	ZnCl ₂ (1:1) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
14	80/20*	Desfiado antes da ativação	ZnCl ₂ (1:1) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
15	65/35**	Desfiado antes da ativação	ZnCl ₂ (1:1) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
16	65/35**	Desfiado antes da ativação	ZnCl ₂ (1:1) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
17	65/35**	Desfiado antes da ativação	ZnCl ₂ (1:1) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
18	65/35**	Desfiado antes da ativação	ZnCl ₂ (1:1) a 2%	Estufa a 110°C por 12h	Seco
19	65/35**	Desfiado sem ativação	-	-	Seco
20	65/35**	Desfiado sem ativação	-	-	Seco
21	65/35**	Desfiado sem ativação	-	-	Seco
22	65/35**	Desfiado sem ativação	-	-	Seco

*80/20 – tecido 80% algodão/20% poliéster

**65/35 – tecido 65% algodão/35% poliéster

Fonte: A autora, 2023.

Como mencionado anteriormente, os tecidos primeiramente foram cortados em quadrados de 1cm, porém notou-se que não havia a carbonização completa. Com isso, os tecidos foram desfiados para haver maior superfície de contato, visando uma queima mais homogênea.

Os tecidos, primeiramente eram desfiados após passarem pelo processo de ativação química para serem pirolisados (Nº 10 a 12 da Tabela 7). Entretanto, percebeu-se que o atrito gerado ao se desfiar o tecido manualmente após a ativação liberava partículas que poderiam ser o cloreto de zinco se desprendendo do tecido, o que faria com que a ativação química não surtisse efeito quando o tecido fosse pirolisado. Visto isso, passou-se a desfiar o tecido antes da ativação química (Nº 13 a 18 da Tabela 7), para não haver nenhuma interferência nem perda do agente ativador.

Após essas análises, foram desfiados tecidos sem ativação (Nº 19 a 22 da Tabela 7) para efeitos de comparação com as outras amostras.

A concentração de cloreto de zinco aumentou durante os procedimentos, para efeitos comparativos, a fim de testar qual concentração seria satisfatória para o beneficiamento dos resíduos gerados pela pirólise, de 1:0.2 ou de 1:1.

Na pirólise realizada no Nº 2, o tecido não foi inserido no reator em estado seco, pois necessitava-se testar se o tecido teria melhor performance em estado seco ou molhado na pirólise. Entretanto, durante esta pirólise, a purga não foi realizada com sucesso, pois o gás nitrogênio estava entrando no reator, mas não estava saindo. Com isso, testou-se aumentar o fluxo de nitrogênio, ocasionando a ruptura do condensador, graças à alta pressão que foi instaurada no reator (Figura 31). Isso se deve porque, o tecido embebido em água faz com que o ar não consiga fluir pelo reator, impossibilitando que a pirólise ocorra devido ao não fluxo de gás.

Figura 31 – Imagem do condensador de vidro quebrado



Fonte: A autora, 2022.

Visto isso, a partir desta pirólise, todos os tecidos passaram a ser inseridos em estado seco nos reatores, seja de forno em isoterminia ou em rampa de temperatura.

4.3.2 Pirólise em fornos de leito fixo vertical

Feita a preparação dos tecidos, os mesmos eram inseridos no respectivo reator do forno em análise, com auxílio de um bastão de vidro, visando o empacotamento de forma homogênea ao longo de todo o comprimento do reator. Em todas as pirólises foi feita purga de 5 min com gás nitrogênio, sendo o fluxo de 20mL/min no forno em isoterma e de 100mL/min no forno em gradiente de temperatura. Ao todo, foram realizadas 22 pirólises, 12 em forno em gradiente de temperatura e 10 no forno em isoterma, como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados das pirólises realizadas

Nº	Tecido	Forma do tecido	Tipo de aquecimento	Tempo de estabilização (min)	Temperatura final de pirólise (°C)	Tempo na temperatura final (min)	Massa inicial de tecido (g)	Massa final de resíduo (g)	% de líquido + gás	% de resíduo
1	80/20*	Quadrados de 1cm	Rampa***	-	400	15	13,001	4,744	63,51	36,49
2	80/20*	Quadrados de 1cm	Rampa***	-	400	-	3,002	-	-	-
3	80/20*	Quadrados de 1cm	Isoterma	-	450	15	3,000	2,713	9,57	90,43
4	80/20*	Quadrados de 1cm	Isoterma	-	450	30	3,000	2,652	11,60	88,40
5	80/20*	Quadrados de 1cm	Isoterma	-	450	30	0,999	0,404	59,56	40,44
6	80/20*	Quadrados de 1cm	Isoterma	-	450	30	1,501	0,601	59,96	40,04
7	80/20*	Quadrados de 1cm	Isoterma	-	450	60	1,002	0,833	16,87	83,13
8	80/20*	Quadrados de 1cm	Isoterma	-	450	60	1,499	1,045	30,29	69,71
9	80/20*	Quadrados de 1cm	Isoterma	-	450	60	2,001	1,413	29,39	70,61
10	80/20*	Desfiado pós ativação	Isoterma	-	485	30	1,000	0,657	34,30	65,70
11	80/20*	Desfiado pós ativação	Isoterma	-	485	60	1,000	0,498	50,20	49,80
12	80/20*	Desfiado pós ativação	Isoterma	-	485	90	1,000	0,635	36,50	63,50
13	80/20*	Desfiado antes da ativação	Rampa***	35	485	90	2,000	0,366	81,70	18,30
14	80/20*	Desfiado antes da ativação	Rampa***	34	485	60	2,001	0,468	76,61	23,39
15	65/35**	Desfiado antes da ativação	Rampa***	-	485	60	2,003	-	-	-
16	65/35**	Desfiado antes da ativação	Rampa***	33	485	90	2,003	0,129	93,56	6,44
17	65/35**	Desfiado antes da ativação	Rampa***	36	485	90	2,001	0,164	91,80	8,20
18	65/35**	Desfiado antes da ativação	Rampa***	42	485	90	2,001	0,917	54,17	45,83
19	65/35**	Desfiado sem ativação	Rampa***	35	485	30	2,002	0,817	59,19	40,81
20	65/35**	Desfiado sem ativação	Rampa***	35	485	45	2,003	0,434	78,33	21,67
21	65/35**	Desfiado sem ativação	Rampa***	35	485	60	2,001	1,591	20,49	79,51
22	65/35**	Desfiado sem ativação	Rampa***	35	485	60	2,005	1,487	25,84	74,16

*80/20 – tecido 80% algodão/20% poliéster

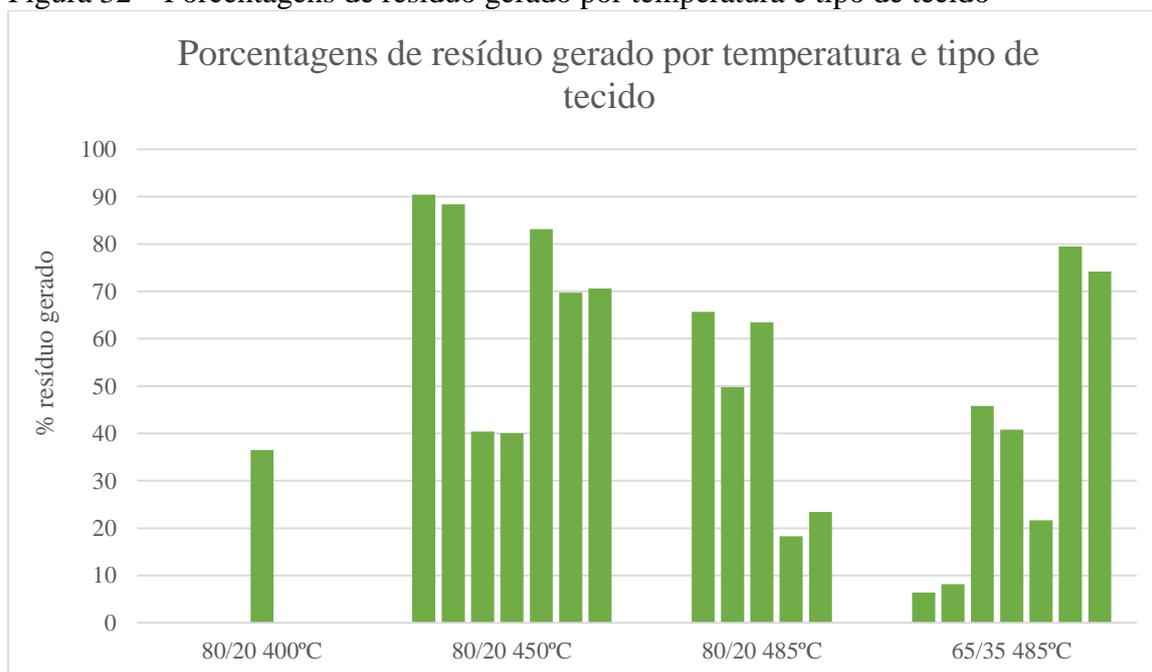
**65/35 – tecido 65% algodão/35% poliéster

*** Rampa – Pirólise realizada em gradiente de temperatura

Fonte: A autora, 2023.

As temperaturas utilizadas na pirólise sofreram aumento, indo de 400°C, para 450°C, até chegar a 485°C. Isso ocorreu para se avaliar se existia alguma correlação entre o aumento da temperatura e a porcentagem de geração de resíduos. Como visto na Figura 32, percebe-se um aumento da porcentagem dos resíduos gerados aos 450°C, quando comparado ao gerado em 400°C, apresentando leve diminuição geral da porcentagem ao aumentar a temperatura para 485°C, tanto no tecido 80% algodão/20% poliéster quanto no 65% algodão/35% poliéster.

Figura 32 – Porcentagens de resíduo gerado por temperatura e tipo de tecido

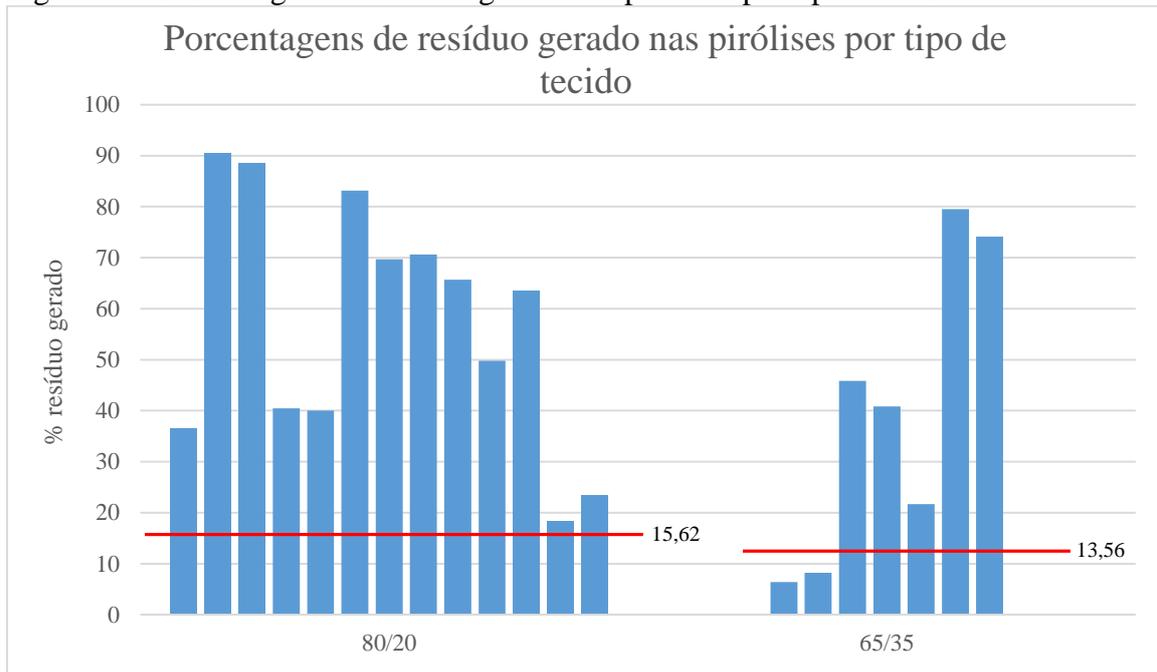


Fonte: A autora, 2023.

Na Figura 32 nota-se que houve variações de temperatura nas pirólises do tecido 80% algodão/20% poliéster, mas no tecido 65% algodão/35% poliéster apenas foram feitas pirólises com a temperatura de 485°C. Isso ocorreu pois foi escolhido realizar os testes com todas as variáveis possíveis de tempo, temperatura de pirólise e preparo do tecido com o primeiro, para depois repetir os melhores resultados encontrados com o segundo tecido.

Percebe-se que as porcentagens finais de resíduos não condisseram, em nenhuma pirólise, com o visto no TGA para ambos os tecidos (15,62% para o tecido 80% algodão/20% poliéster e de 13,56% para o tecido 65% algodão/35% poliéster), mesmo sendo realizadas em temperaturas acima das descritas para degradação dos tecidos (422,09°C para o tecido 80% algodão/20% poliéster e de 425,63°C para o tecido 65% algodão/35% poliéster), como mostrado na Figura 33.

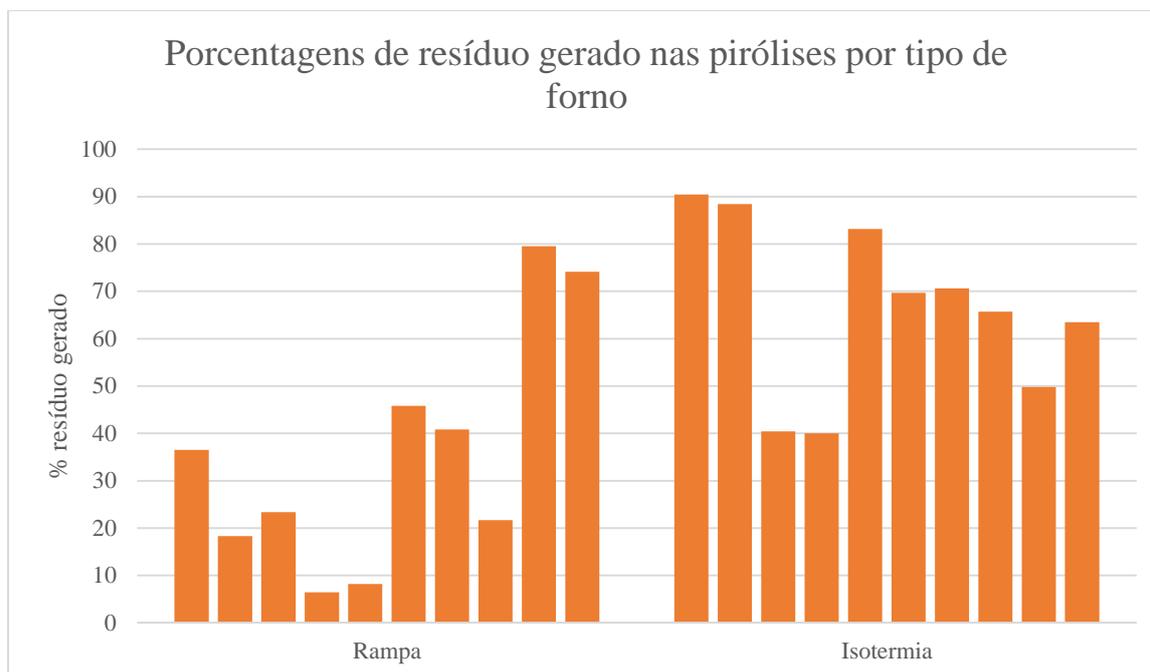
Figura 33 - Percentagens de resíduo gerado nas pirólises por tipo de tecido



Fonte: A autora, 2023.

Quanto aos tipos de forno, no aquecimento em isoterma, percebe-se que as percentagens de resíduos variam entre 40,04% a 90,43%, valores extremos quando comparados ao que é apontado no TGA (Figura 34). Essa situação pode ter ocorrido pelo fato do reator utilizado ser estreito e o empacotamento dos tecidos ser mais comprimido, dificultando a troca de calor e queima total dos resíduos finais, permanecendo, muitas vezes, pedaços intactos de tecido não carbonizado nas amostras finais. Visto isso, percebe-se que o forno de leito fixo em isoterma não foi adequado para a pirólise total dos tecidos têxteis em estudo.

Figura 34 – Percentagens de resíduo gerado nas pirólises por tipo de forno



Fonte: A autora, 2023.

Quanto ao aquecimento em rampa (Figura 34), o mesmo ocorreu em pirólises realizadas sob as mesmas condições de temperatura, tempo na temperatura final, tipo de forno e massa inicial do tecido, como foi o caso das pirólises 16, 17 e 18, da Tabela 8. Observa-se que as percentagens finais de resíduos variaram entre 6,44, 8,20 e 45,83, sendo as menores que a descrita pelo TGA causadas por erros experimentais. Essas variações, por ocorrerem em situações iguais, demonstram que as variáveis previamente citadas não causaram essas diferenças nos produtos finais. A forma de empacotamento dos tecidos no reator e até mesmo o tipo de forno, são variáveis que podem ter acarretado essa discrepância nos resultados finais, pois o empacotamento era realizado manualmente, sem se ter o controle exato da distribuição interna do material, além do fato do material não ser um condutor térmico (ROCHA, 2014), dificultando sua queima de forma homogênea por meio da indução gerada pelo forno de leito fixo. Isso mostra que o forno de leito fixo em rampa de temperatura não foi adequado para a total carbonização de forma efetiva dos tecidos.

Ao comparar os dois fornos na Figura 34, nota-se que o em rampa de temperatura gerou menores percentagens de resíduos finais, se assemelhando mais aos resultados encontrados no TGA.

Alguns resíduos carbonizaram completamente e/ou parcialmente, apresentando uma massa final considerável. Com isso, eles foram submetidos aos testes de adsorção, presentes da

Tabela 10 apresentada no item a seguir, para avaliar se a ativação química poderia auxiliar o resíduo a adsorver contaminantes.

4.3.3 Ensaio de adsorção

Para efetuar a curva de calibração, cada concentração de azul de metileno foi analisada 5 vezes no espectrofotômetro, tendo os resultados dispostos na Tabela 9.

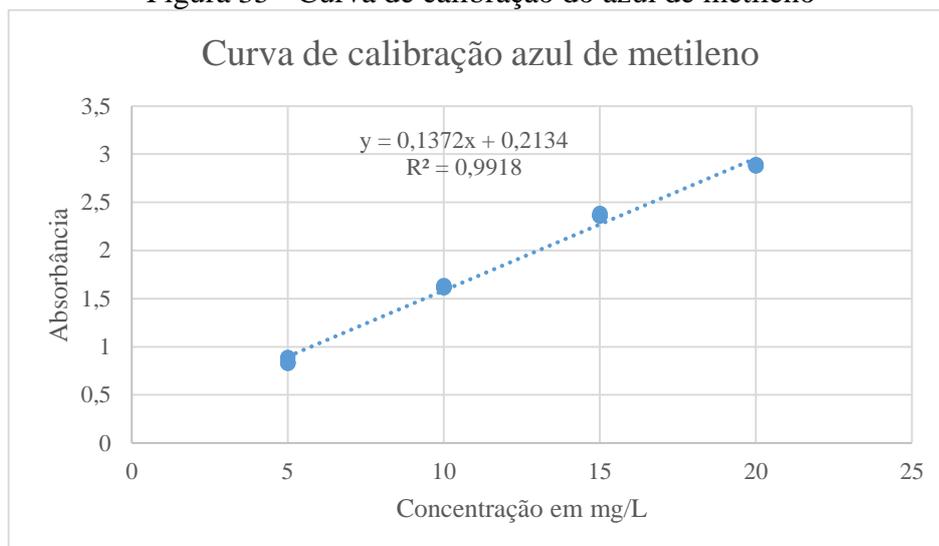
Tabela 9 - Dados do espectrofotômetro

Soluções (mg/L)	Absorbância a 665nm
5	0,891
5	0,847
5	0,833
5	0,829
5	0,826
10	1,633
10	1,620
10	1,618
10	1,614
10	1,611
15	2,386
15	2,367
15	2,359
15	2,359
15	2,361
20	2,885
20	2,88
20	2,878
20	2,891
20	2,881

Fonte: A autora, 2022.

A Figura 35 apresenta a curva de calibração do azul de metileno usada nos ensaios de adsorção.

Figura 35 - Curva de calibração do azul de metileno



Fonte: A autora, 2022.

Nota-se que a curva atinge o ideal de $R^2 = 0,9918$ (Figura 32) tendo sua equação da reta $y = 0,1372x + 0,2134$.

Após feita a curva de calibração, foram realizados ensaios de adsorção com carvão ativado comercial (CAC) a fim de se comparar com os resultados obtidos nos ensaios com os resíduos gerados por meio da pirólise dos tecidos em estudo. A Tabela 10 apresenta os dados dos testes de adsorção realizados, tanto no CAC quanto em alguns resíduos gerados pelas pirólises apresentadas na Tabela 8. Cada linha apresenta uma triplicata realizada, sendo os resultados apresentados provenientes de média aritmética.

Tabela 10 - Dados dos testes de adsorção

Nº	Item	Média da massa (g)	Tempo na mesa agitadora (min)	Tempo na centrífuga (min)	Concentração de azul de metileno (mg/L)	% remoção	Desvio padrão
1	CAC	0,0201	5	45	25	99	0,47
2	CAC	0,0200	10	45	25	98	0,94
3	CAC	0,0203	15	45	25	99	0,00
4	CAC	0,0200	20	45	25	99	0,00
5	CAC	0,0201	25	45	25	99	0,00
6	CAC	0,0202	5	5	25	95	1,05
7	CAC	0,0205	2	5	100	88	8,66
8	CAC	0,0202	2	5	100	86	4,62
9	CAC	0,0201	2	5	100	90	4,25
10	CAC	0,0201	2	5	100	97	0,70
11	Resíduo de tecido 80/20 N° 10, sem lavar	0,0202	2	5	100	-	-
12	Resíduo de tecido 80/20 N° 10, lavado com condutivímetro	0,0201	2	5	100	-	-

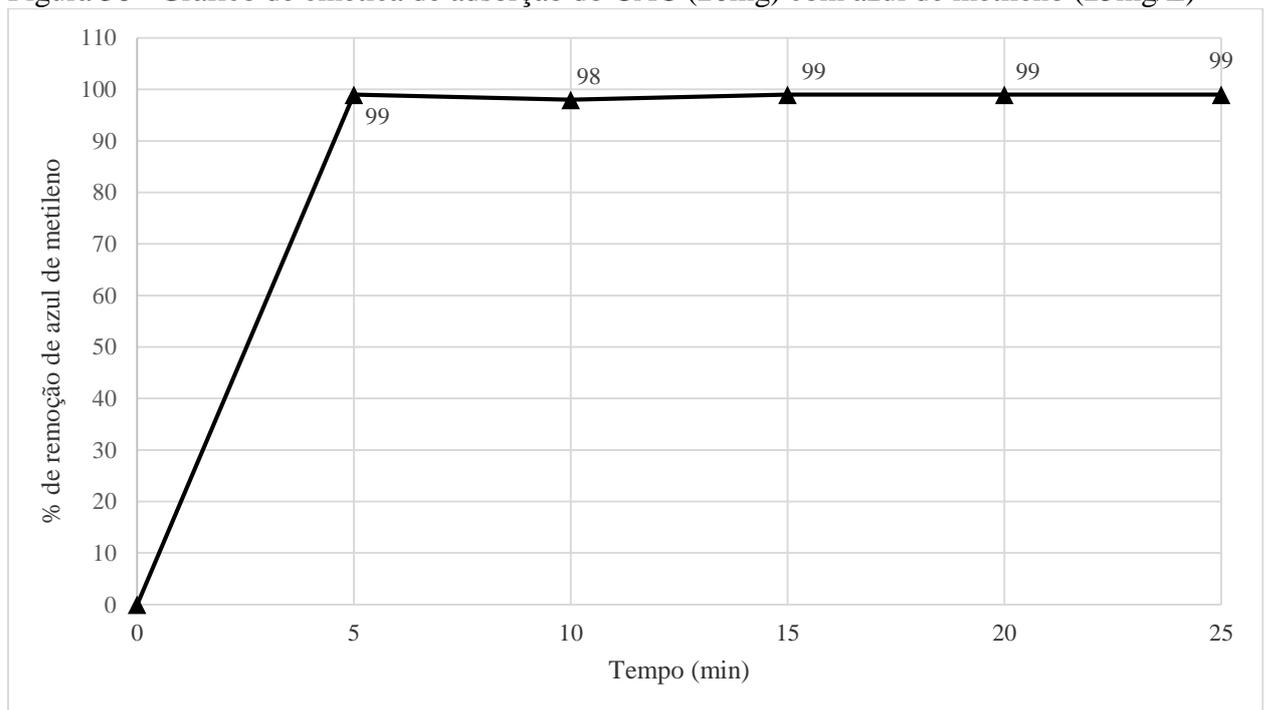
13	Resíduo de tecido 80/20 N° 11, lavado	0,0202	2	5	100	-	-
14	Resíduo de tecido 80/20 N° 11, lavado com condutivímetro	0,0202	2	5	100	-	-
15	Resíduo de tecido 80/20 N° 13, lavado com condutivímetro	0,0202	2	5	100	-	-
16	Resíduo de tecido 65/35 N° 16, lavado com condutivímetro	0,0206	2	5	100	-	-

Fonte: A autora, 2023.

Tendo em vista que a pirólise de tecidos têxteis mistos gera pouca massa de resíduos, os testes com o CAC foram realizados com pequenas quantidades do mesmo, para que pudessem ser replicados com os resíduos da pirólise. Com isso, variações nos testes para que pudessem ser realizadas isotermas e análises cinéticas variando a massa não puderam ser realizados, visto que não poderiam ser replicados com os resíduos gerados.

As análises de 1 a 5, da Tabela 10, variaram o tempo na mesa agitadora, mantendo os mesmos valores de massa de CAC utilizada (20mg), de concentração de azul de metileno (25mg/L) e o tempo na centrífuga (45min) (Figura 36).

Figura 36 - Gráfico de cinética de adsorção do CAC (20mg) com azul de metileno (25mg/L)

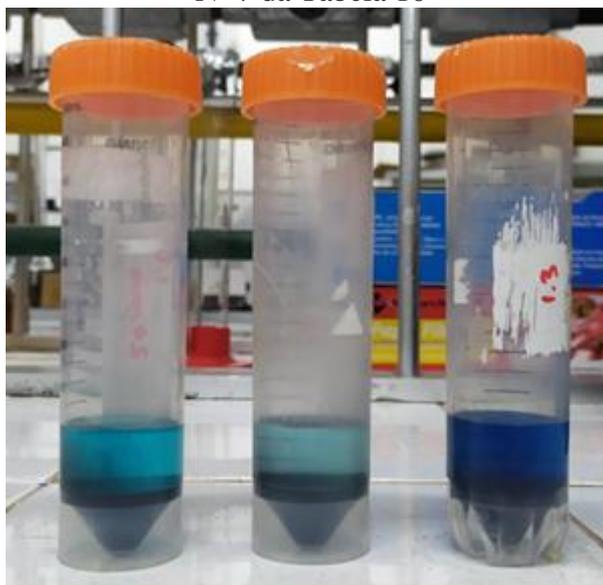


Fonte: A autora, 2023.

Como mostrado na Figura 36, a remoção de azul de metileno atingiu 99% em 5 minutos, indicando afinidade entre o CAC e o azul de metileno. Nota-se que essa porcentagem de remoção permaneceu estável, apresentando baixa variabilidade após os 10 minutos, estabilizando a adsorção em 99% após 15 minutos, sugerindo-se, então, que esse seja o tempo de equilíbrio da amostra. Ao aumentar a concentração de azul de metileno para 100mg/L, notou-

se que as colorações das amostras ficavam desiguais após passarem pela mesa agitadora e centrífuga (Figura 37), mostrando que o tempo das análises não era suficiente para atingir o ponto de equilíbrio de uma concentração de azul de metileno mais elevada.

Figura 37 - Amostras do teste de adsorção de CAC (20mg) com azul de metileno (100mg/L) – N° 7 da Tabela 10



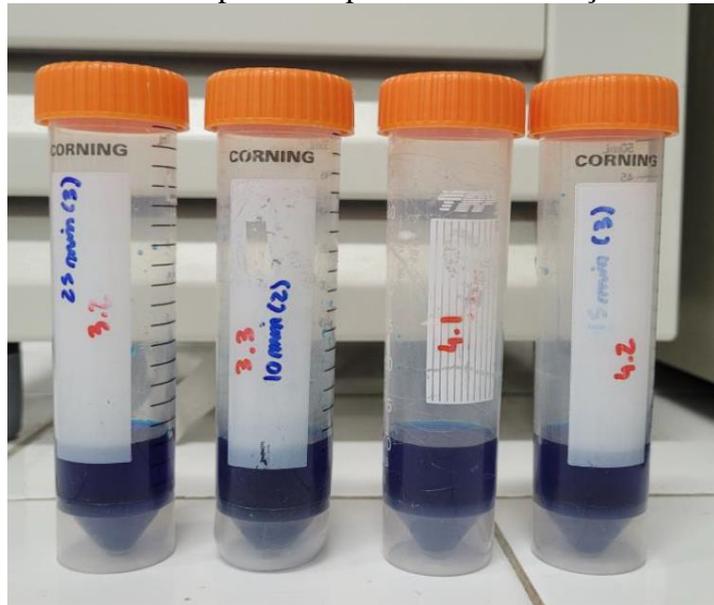
Fonte: A autora, 2022.

Devido à baixa quantidade de resíduos gerados pela pirólise dos tecidos têxteis, os testes realizados com o CAC alternando o tempo não puderam ser realizadas, visto que não conseguiriam ser replicadas com o resíduo de apenas uma pirólise.

Com isso, visando avaliar se havia remoção do azul de metileno, indicando uma possível adsorção, os resíduos de 4 pirólises dos tecidos foram submetidos ao teste com menor tempo e maior concentração de azul de metileno. Alguns destes resíduos passaram por preparo através lavagem com aferição em condutivímetro, para remoção do agente ativador que estava impregnado no mesmo, e outros não.

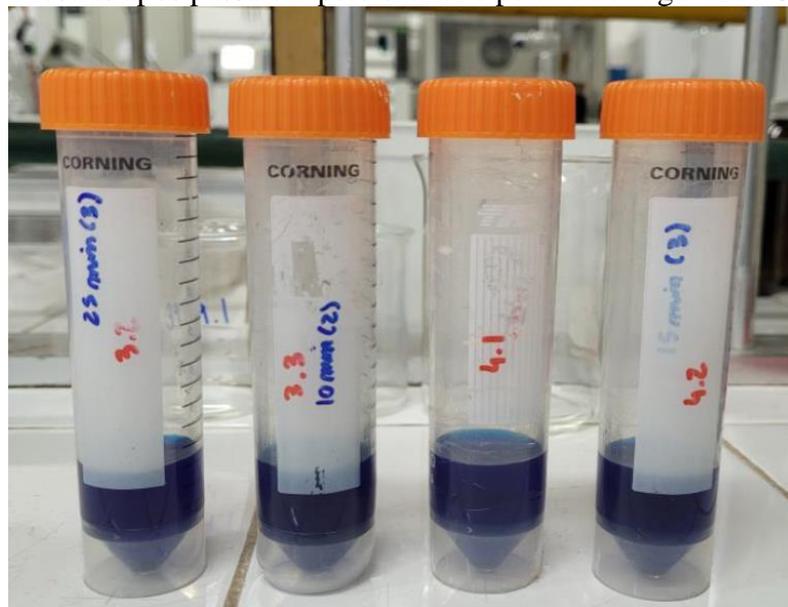
Notou-se que, independente da forma de preparo dos resíduos gerados pela pirólise para os testes de adsorção, nenhum removeu o azul de metileno, conforme mostrado na comparação entre a solução de azul de metileno com o resíduo antes (Figura 38) e depois dos ensaios (Figura 39), da análise N° 13 da Tabela 10.

Figura 38 - Amostras antes de passarem pelo teste de adsorção – N° 13 da Tabela 10



Fonte: A autora, 2022.

Figura 39 - Amostras após passarem pelo shaker e pela centrífuga – N° 13 da Tabela 10



Fonte: A autora, 2022.

Percebe-se, pelas Figuras 38 e 39, que não houve adsorção do azul de metileno quando em contato com o resíduo gerado pela pirólise, que passou por ativação, visto que as colorações permaneceram as mesmas de antes do teste e após o teste de adsorção ser realizado.

Mesmo não apresentando remoção visualmente, tentou-se retirar alíquotas do sobrenadante para avaliação no espectrofotômetro. Entretanto, todos os resíduos gerados pela pirólise, independente da forma de tratamento e da composição do tecido que o originou, apresentaram baixa densidade, tanto em água (Figura 40), quanto na solução de azul de metileno

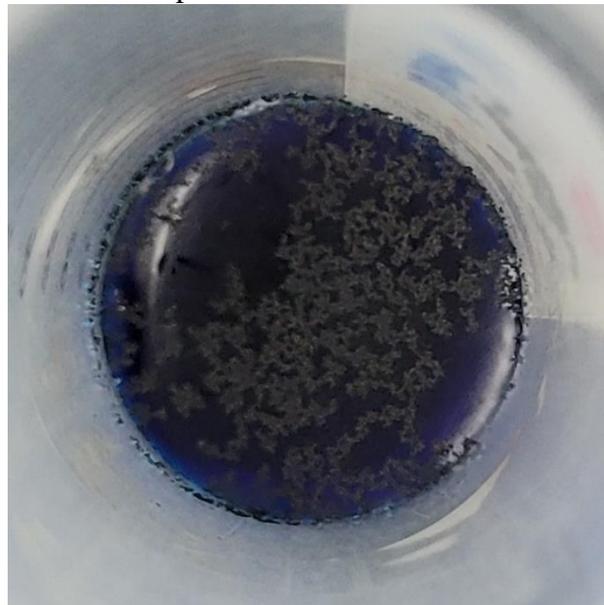
(Figura 41), impossibilitando a remoção de alíquotas, além de dificultar seu manuseio, por se fixarem em qualquer superfície que tivessem contato.

Figura 40 - Resíduo pirolisado de tecidos em água



Fonte: A autora, 2022.

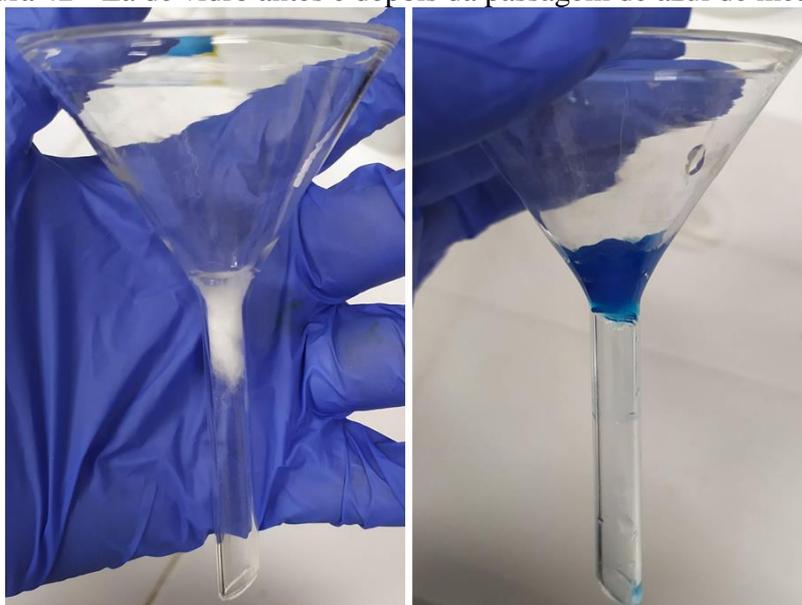
Figura 41 - Resíduo pirolisado de tecidos em azul de metileno



Fonte: A autora, 2022.

Para tentar remover o carvão das alíquotas para aferição no espectrofotômetro, foram realizados testes com lã de vidro para separação dos resíduos da solução de azul de metileno. Entretanto, como visto na Figura 42, a lã de vidro reteve o azul de metileno, alterando assim sua concentração na solução, interferindo no resultado final.

Figura 42 - Lã de vidro antes e depois da passagem de azul de metileno



Fonte: A autora, 2022.

Após os testes de adsorção, tendo em vista os resultados apresentados, percebe-se que os resíduos da pirólise de tecidos têxteis mistos de algodão com poliéster, nas condições apresentadas, não são adequados para uso visando a adsorção de contaminantes em soluções aquosas.

CONCLUSÃO

A pirólise de resíduos têxteis se mostra eficaz para o seu manejo e gestão, visto que reduz mais de 84% a massa dos tecidos mistos de algodão e poliéster.

Ao ser realizada a pirólise, notou-se que as condições em que foi realizada, como o forno ser de leito fixo e a forma de empacotamento dos tecidos no reator ser manual e não homogênea, promoveram erros experimentais nos resíduos resultantes, levando-os a apresentarem porcentagens maiores de massa do que o analisado em TGA. Para isso, um forno de leito fluidizado ou rotativo poderia promover uma troca de calor mais homogênea com o tecido, reduzindo sua massa de forma mais eficiente.

Na pirólise, o tecido 80% algodão/20% poliéster (15,62%), gera maiores quantidades de resíduos quando comparado ao 65% algodão/35% poliéster (13,56%). Percebe-se que, quanto maior a quantidade de resíduos gerados pela pirólise, maior a quantidade de fibras encontradas nesses resíduos. Essas fibras, pela composição e tamanho, são classificadas como microplásticos.

Ao ser realizada uma projeção para 1kg de resíduos gerados, chegou-se ao valor de até 25,77 milhões de microplásticos encontrados nos resíduos do tecido 80% algodão/20% poliéster e até 16,63 milhões, no tecido 65% algodão/35% poliéster, enfatizando a importância do descarte correto dos resíduos têxteis para não haver contaminação do solo, ar e água.

Ao ser realizado o beneficiamento desses resíduos da pirólise, nota-se que os mesmos não apresentaram características para se transformarem em materiais adsorventes, mesmo tendo passado por ativação química, devido à não adsorção do corante azul de metileno nas análises realizadas.

Desse modo, conclui-se que a pirólise de tecidos têxteis mistos de algodão com poliéster é eficaz na redução de massa, auxiliando em uma melhor gestão desses resíduos. Além de enfatizar a necessidade de descarte correto dos mesmos, visto que são considerados as matérias-primas que mais disseminam microplásticos no meio ambiente, indicando uma necessidade de mais estudos para avaliar os danos reais causados por eles nos seres vivos.

SUGESTÕES FUTURAS

- Avaliação da qualidade do líquido e do gás gerados pela pirólise de tecidos têxteis mistos de poliéster e algodão
- Avaliação de outras possibilidades de beneficiamento do resíduo gerado
- Pirólise dos tecidos têxteis mistos em outros tipos de fornos de pirólise

REFERÊNCIAS

ABIT. **Perfil do setor**. 2023. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 22 abr. 2023.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos 2022**. 2023. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 22 abr. 2023.

ALBUQUERQUE, C. O. de. **ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE NA MODA: a percepção do consumidor**. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: [https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/34340/1/DISSERTAÇÃO Cibele Oliveira de Albuquerque.pdf](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/34340/1/DISSERTAÇÃO%20Cibele%20Oliveira%20de%20Albuquerque.pdf). Acesso em: 4 jul. 2022.

BEALL, A. **Why clothes are so hard to recycle**. 2020. Disponível em: <https://www.bbc.com/future/article/20200710-why-clothes-are-so-hard-to-recycle>. Acesso em: 02 out. 2023.

BRASIL. Decreto Nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022 - Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/d10936.htm. Acesso em: 22 abr. 2023.

_____. Decreto Nº 11.043, de 13 de abril de 2022 - Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm. Acesso em: 22 abr. 2023.

_____. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 22 abr. 2023.

BROWN, R. **The Environmental Crisis Caused by Textile Waste**, 2021. Disponível em: <https://www.roadrunnerwm.com/blog/textile-waste-environmental-crisis>. Acesso em: 6 nov. 2021.

CAIXETA, D. S. et al. MICROPLÁSTICOS COMO INDICADORES DE POLUIÇÃO AMBIENTAL E SEUS EFEITOS SOBRE OS ORGANISMOS. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Jandaia-GO, v. 19, n. 40, 2022. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2022b/microplasticos.pdf>. Acesso em: 02 ago. 2023.

CARLSON, C.; EBBENIS, A. **Introduction to Activated Carbon**. 2022. Disponível em: <https://feeco.com/introduction-to-activated-carbon/>. Acesso em: 25 fev. 2022.

CHEN, W. et al. Adsorption of 1-naphthylamine from aqueous solution onto granular activated carbon: Kinetics, isotherm, and influencing factors. **Journal of Hazardous Materials**, 165(1), 383-389, 2009.

CHEN, W. et al. Activated carbon powders from wool fibers, **Powder Technology**, v. 234, p.

76–83, 1 jan. 2013. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2012.09.026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591012006390>. Acesso em: 7 fev. 2022.

CHEN, W. et al. Pyrolysis Behavior and Pore-Forming Mechanism During Reuse of Textile Waste Flax by Activation. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 8, p. 4259 – 4268, 2019. DOI: 10.1007/S12649-019-00770-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-019-00770-2>. Acesso em: 21 out. 2021.

CHOWDHURY, R.; SARKAR, A. Reaction kinetics and product distribution of slow pyrolysis of Indian textile wastes. **International Journal of Chemical Reactor Engineering**, v. 10, n. 1, 2012. ISSN 15426580. Disponível em: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84872102156&origin=inward>. Acesso em: 14 set. 2023.

COMPANY, M.; AGENDA, G. F. **Fashion on climate: How the fashion industry can urgently act to reduce its green house gas emission**, 2020.

COUTINHO, L. D. **TECIDO DE ALGODÃO FUNCIONALIZADO COM NANOPARTÍCULAS DE PRATA VISANDO PRODUÇÃO DE MATERIAL BACTERICIDA**. 2018. Monografia (CURSO DE ENGENHARIA TÊXTIL) — UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5694/1/AP_COENT_2018_1_06.pdf. Acesso em: 12 out. 2023.

DECOR, J. **Tecido Tricoline - Utilidades, características e onde comprar**. 19 maio 2020. Disponível em: <https://www.jcdecor.com.br/blog/tecido-tricoline/>. Acesso em: 22 ago. 2022.

DIAS, D. L. **Polímero PET**. 2023. Disponível em: <https://escolakids.uol.com.br/ciencias/polimero-pet.htm>. Acesso em: 12 out. 2023.

FLORES-OCAMPO, I. Z.; ARMSTRONG-ALTRIN, J. S. Abundance and composition of microplastics in Tampico beach sediments, Tamaulipas State, southern Gulf of Mexico. **Marine Pollution Bulletin**, v. 191, Junho 2023. ISSN 18793363. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X23003223?via%3Dihub>. Acesso em: 16 abr. 2023.

HENDGES, A. S. **Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. EcoDebate, 2021. Disponível em: <https://www.ecodebate.com.br/2021/06/29/composicao-gravimetrica-dos-residuos-solidos-urbanos-no-brasil/>. Acesso em: 27 set. 2023.

ITMF. **ITMF Annual Conference Report 2017 - Technology, Trade, Climate-Oriented in Disruptive Times**. . [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: https://www.itmf.org/images/dl/member-area/conference-reports/Annual-Conference-Report_2017_full.pdf.

KASVI. **Espectrofotometria – Princípios e aplicações** . 29 jul. 2016. Disponível em: <https://kasvi.com.br/espectrofotometria-principios-aplicacoes/>. Acesso em: 7 mar. 2022.

KAZA et al. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. 2018. Urban Development Series. Washington, DC: World Bank, 2018. DOI: 10.1596/978-1-4648-1329-0. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.

LEE, H. W. et al. "Review of the use of activated biochar for energy and environmental applications", **Carbon letters**, v. 26, n. 1, p. 1–10, 1 maio 2018. DOI: 10.5714/CL.2018.26.001. Disponível em: <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201814446220708.page>. Acesso em: 7 fev. 2022.

LEE, H. S. et al. Upcycling textile waste using pyrolysis process. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 859, Fev. 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722074952?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8069ce5a297a1f7d. Acesso em: 14 set. 2023.

LIMA, A. F. de et al. Adsorção de azul de metileno em hidrocarbões de resíduos têxteis. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, 2020. ISSN 1517-7076. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/pHK9FwKSzmqG5zBgj5jZxy/?lang=pt>. Acesso em: 21 abr. 2023.

LUCENA, J. E. de. **Adsorção de corantes têxteis por carvão ativado preparado a partir do aguapé (Eichhornia crassipes)**. 2014. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Maranhão. Disponível em: <https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/984>. Acesso em: 8 fev. 2022.

MAIA, L. S. et al. "Activated Carbon From Palm Fibres Used as an Adsorbent for Methylene Blue Removal", **Journal of Polymers and the Environment**, v. 29, n. 4, p. 1162–1175, 2021. DOI: 10.1007/s10924-020-01951-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01951-0>.

MENEGUCCI, F. et al. **Resíduos têxteis: Análise sobre descarte e reaproveitamento nas indústrias de confecção**, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318930023_Residuos_texteis_Analise_sobre_descarte_e_reaproveitamento_nas_industrias_de_confeccao. Acesso em: 9 fev. 2022.

MIRANDA, R. et al. Pyrolysis of textile wastes I. Kinetics and yields. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 80, n. 2, p. 489 – 495, 10 2007.

MODEFICA; FGVCES; REGENERATE. **Fios da Moda: Perspectiva Sistêmica para Circularidade**. 2020. Disponível em: <https://loja.modefica.com.br/produto/publicacoes/fios-da-moda-perspectiva-sistemica-para-circularidade/>. Acesso em: 21 abr. 2023.

MORAES, M. **Celulose: descubra o que é e sua utilização!** 2022. Disponível em: <https://agropos.com.br/celulose/>. Acesso em: 12 out. 2023.

NAHIL, M. A.; WILLIAMS, P. T. Activated carbons from acrylic textile waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Elsevier, v. 89, p. 51 – 59, Set. 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237010000793?via%3Dihub>. Acesso em: 21 out. 2022.

NAHIL, M. A., WILLIAMS, P. T. "Surface chemistry and porosity of nitrogen-containing activated carbons produced from acrylic textile waste", **Chemical Engineering Journal**, v. 184, p. 228–237, 1 mar. 2012. DOI: 10.1016/J.CEJ.2012.01.047.

PEREIRA, G. de S. **Materiais e Processos Têxteis**. Santa Catarina, 2009. Disponível em: <https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/temp/0/07/20090218180450!MPTEX6.pdf>. Acesso em: 22 out. 2022.

PINHEIRO, E., FRANCISCO, A. C. de. "**O DESEMPENHO AMBIENTAL E O DESCARTE DE RESÍDUOS TÊXTEIS NAS INDÚSTRIAS DE CONFECÇÕES-UMA ABORDAGEM TEÓRICA**", 2013. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_tn_sto_187_063_23310.pdf. Acesso em: 7 fev. 2022.

RECICLA SAMPA. **Saiba tudo sobre a reciclagem de resíduos têxteis no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/saiba-tudo-sobre-a-reciclagem-de-residuos-texteis-no-brasil>. Acesso em: 22 abr. 2023.

REZAIYAN, J., CHEREMISINOFF, N. P. **Gasification technologies: A primer for engineers and scientists**. [S.l: s.n.], 2005.

ROCHA, V. R. da. **A Física por trás dos tecidos**. 2014. Disponível em: <https://www.monolitonimbus.com.br/a-fisica-por-tras-dos-tecidos/>. Acesso em: 15 set. 2023.

SANTOS, A. **Falta de apoio e comunicação falha: os desafios na gestão de resíduos têxteis brasileiros**. 2023. Disponível em: <https://soudealgodao.com.br/blog/desafios-na-gestao-de-residuos-texteis-brasileiros/>. Acesso em: 15 set. 2023.

SILVEIRA, P. D. **Avaliação do potencial da pirólise de resíduos sólidos urbanos como processamento termoquímico para recuperação de matéria e energia**. 2015. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/11998>. Acesso em: 7 fev. 2022.

SOUSA, C. M. T. de. **Valorização energética de resíduos industriais têxteis e poliméricos**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado), Universidade do Minho, 2009. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/10500/1/tese.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2022.

SUSTEXMODA. **Residômetro**. 2021. Disponível em: <https://www.sustexmoda.org/residômetro>. Acesso em: 22 abr. 2023.

TEIXEIRA, J. A. **Análise prática da pirólise de resíduos têxteis compostos de viscose e poliéster para obtenção de carvão e bio-óleo em reator de leito fixo sem fluxo de gás**. 2019. Tese (Doutorado), Ribeirão Preto. Disponível em: <http://repositorio.unaerp.br/handle/12345/194>. Acesso em: 8 fev. 2022.

TONIOLLO, M.; ZANCAN, N. P.; WÜST, C. INDÚSTRIA TÊXTIL: SUSTENTABILIDADE, IMPACTOS E MINIMIZAÇÃO. In: **VI Congresso Brasileiro de**

Gestão Ambiental. Porto Alegre: IBEAS, 2015. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2015/V-029.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2023.

VIANA, M. M. **OBTENÇÃO E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS DE PIRÓLISE DO LODO DE ESGOTO PARA ADSORÇÃO DE POLUENTES EM MEIO AQUOSO**. Tese (Doutorado), São Paulo, Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-18082014-115608/pt-br.php>. Acesso em: 8 fev. 2022.

WAMPLER, T. P. **Applied Pyrolysis Handbook**. 2nd. ed. [S.l: s.n.], 2007.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Coronavirus disease (COVID-19): Masks. 2021. Disponível em: <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19-masks>. Acesso em: 6 nov. 2021.

WILLIAMS, P. T.; REED, A. R. High grade activated carbon matting derived from the chemical activation and pyrolysis of natural fibre textile waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 71, n. 2, p. 971 – 986, 2004. DOI: 10.1016/J.JAAP.2003.12.007.

WILLIAMS, P. T.; REED, A. R. Pre-formed activated carbon matting derived from the pyrolysis of biomass natural fibre textile waste. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Elsevier, v. 70, p. 563 – 577, Dez. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237003000263?via%3Dihub>. Acesso em: 21 out. 2022.

XU, Z. et al. "Highly mesoporous activated carbon synthesized by pyrolysis of waste polyester textiles and MgCl₂: Physiochemical characteristics and pore-forming mechanism", **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 453–461, 10 ago. 2018. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.05.007.

YADAV, S. et al. Recent analytical techniques, and potential eco-toxicological impacts of textile fibrous microplastics (FMPs) and associated contaminants: A review. **Chemosphere**, Elsevier, v. 326, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653523007622?ref=cra_js_challenge&fr=RR-1. Acesso em: 15 set. 2023.

YOUSEF, S. et al. "A sustainable bioenergy conversion strategy for textile waste with self-catalysts using mini-pyrolysis plant", **Energy Conversion and Management**, v. 196, p. 688–704, 15 set. 2019. DOI: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.06.050.

ZABIHI, M., HAGHIGHI ASL, A., AHMADPOUR, A. "Studies on adsorption of mercury from aqueous solution on activated carbons prepared from walnut shell", **Journal of Hazardous Materials**, v. 174, n. 1–3, p. 251–256, 15 fev. 2010. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2009.09.044.