

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA DE AGUIAR FIORI

MICROPLÁSTICOS TÊXTEIS: UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FASE
USO DE TECIDOS DE ROUPAS DE ALGODÃO, POLIÉSTER E POLIAMIDA
CONSIDERANDO DESPRENDIMENTO DE MICROPLÁSTICOS NA LAVAGEM

CURITIBA

2025

BRUNA DE AGUIAR FIORI

MICROPLÁSTICOS TÊXTEIS: UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FASE
USO DE TECIDOS DE ROUPAS DE ALGODÃO, POLIÉSTER E POLIAMIDA
CONSIDERANDO DESPRENDIMENTO DE MICROPLÁSTICOS NA LAVAGEM

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, na área de Inovação em Produtos, Projetos e Processos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Fiori, Bruna de Aguiar

Microplásticos têxteis: uma avaliação do ciclo de vida da fase uso de tecidos de roupas de algodão, poliéster e poliamida considerando desprendimento de microplásticos na lavagem. / Bruna de Aguiar Fiori. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno

1. Microplásticos. 2. Tecidos. 3. Poluição. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Maceno, Marcell Mariano Corrêa. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO - 40001016070P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **BRUNA DE AGUIAR FIORI**, intitulada: **MICROPLÁSTICOS TÊXTEIS: UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FASE USO DE TECIDOS DE ROUPAS DE ALGODÃO, POLIÉSTER E POLIAMIDA CONSIDERANDO DESPRENDIMENTO DE MICROPLÁSTICOS NA LAVAGEM**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELL MARIANO CORREA MACENO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 07 de Agosto de 2025.

Assinatura Eletrônica
30/09/2025 16:39:29.0
MARCELL MARIANO CORREA MACENO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
30/09/2025 16:45:01.0
CARLA REGINA MAZIA ROSA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
06/11/2025 16:32:57.0
TAMARA FONSECA DE ALMEIDA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO)

AGRADECIMENTOS

Meu profundo agradecimento à Universidade Federal do Paraná pelo suporte institucional e pela infraestrutura oferecida, essencial para a realização deste estudo. A UFPR se destaca como um ambiente de aprendizado e pesquisa de excelência, promovendo o desenvolvimento acadêmico e profissional de seus alunos. Manifesto minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Marcell Mariano Corrêa Maceno, pelo acompanhamento, orientação e incentivo ao longo desta trajetória. Também expresso meu reconhecimento a todos os professores que, com dedicação e conhecimento, contribuíram significativamente para minha formação.

Agradeço, de maneira especial, ao Labeam (Laboratório de Engenharia Ambiental Francisco Borsari Netto) da UFPR, por ter cedido o espaço e os materiais necessários para a realização das análises e testes laboratoriais desta pesquisa. Registro, ainda, minha sincera gratidão ao Jefferson, graduando do curso de Engenharia de Produção, pelo apoio e colaboração durante o desenvolvimento da pesquisa de mestrado.

RESUMO

O desenvolvimento e a disseminação dos plásticos ao longo do século XIX, marcados por importantes invenções como o celuloide (1869) e o bakelite (1907), impulsionaram uma verdadeira revolução industrial. Contudo, esse progresso trouxe consigo uma preocupante questão ambiental, com a produção atual de plásticos ultrapassando 396 milhões de toneladas e a crescente atenção aos microplásticos. Dada a sua presença alarmante nos ambientes aquáticos e os impactos significativos que podem causar nos ecossistemas, a preocupação da comunidade científica, das políticas públicas e da sociedade em geral se intensificou. Diante desse contexto, este estudo avaliou os impactos ambientais potenciais da fase uso da lavagem de tecidos de roupas de algodão, poliéster e poliamida, considerando o desprendimento de microfibras têxteis durante lavagens domésticas. Para tal finalidade, foi conduzido um procedimento experimental de lavagem controlada, organizado de forma a simular condições usuais do processo doméstico, possibilitando a análise da liberação de microfibras. Para tanto, foram analisados tecidos de algodão, poliéster e poliamida, por meio de sua caracterização física, incluindo peso seco, gramatura, regain, estrutura e densidade linear, além da quantificação da liberação de microfibras. Os impactos ambientais potenciais foram calculados através dos métodos ReCiPe2016 Midpoint (H) e Endpoint (H), e do uso dos fatores de caracterização do MARILCA para a categoria de efeitos físicos na biota. Os resultados demonstraram que as fibras sintéticas, como poliéster e poliamida, apresentam maiores potenciais de impacto ambiental, sobretudo em categorias relacionadas à ecotoxicidade e toxicidade humana, enquanto o algodão, por ser uma fibra natural e biodegradável, demonstrou menores impactos. Adicionalmente, evidenciou-se que as características estruturais dos tecidos e a massa desprendida possuem influência significativa nos danos à qualidade dos ecossistemas. Em suma, este trabalho destaca a importância de considerar o desprendimento de microfibras como um fator determinante na avaliação dos impactos ambientais de produtos têxteis, além do consumo de água e energia. Os achados reforçam a necessidade urgente de práticas mais sustentáveis na indústria e no cotidiano dos consumidores, visando mitigar a poluição potencial gerada pelas lavagens de artigos têxteis.

Palavras-chave: ACV, microplásticos, lavagem de tecidos

ABSTRACT

The development and dissemination of plastics throughout the 19th century, marked by important inventions such as celluloid (1869) and Bakelite (1907), drove a true industrial revolution. However, this progress also brought a concerning environmental issue, with current plastic production exceeding 396 million tons and the growing attention given to microplastics. Due to their alarming presence in aquatic environments and the significant impacts they can cause on ecosystems, the concern of the scientific community, public policies, and society at large has intensified. In this context, this study evaluated the potential environmental impacts associated with the use phase of washing cotton, polyester, and polyamide fabrics, considering the release of textile microfibers during household laundering. For this purpose, a controlled washing experiment was carried out, designed to simulate typical domestic conditions and allow the analysis of microfiber release. Fabrics of cotton, polyester, and polyamide were analyzed through their physical characterization, including dry weight, fabric weight, regain, structure, and linear density, in addition to the quantification of released microfibers. The potential environmental impacts were calculated using the ReCiPe2016 Midpoint (H) and Endpoint (H) methods, along with the use of MARILCA characterization factors for the category of physical effects on biota. The results demonstrated that synthetic fibers, such as polyester and polyamide, present greater potential environmental impacts, particularly in categories related to ecotoxicity and human toxicity, while cotton, being a natural and biodegradable fiber, showed lower impacts. Furthermore, it was evidenced that the structural characteristics of fabrics and the amount of released mass significantly influence damage to ecosystem quality. In summary, this study highlights the importance of considering microfiber release as a determining factor in the environmental impact assessment of textile products, in addition to water and energy consumption. The findings reinforce the urgent need for more sustainable practices in the textile industry and in consumer behavior, aiming to mitigate the potential pollution generated by the laundering of textile articles.

Keywords: LCA, microplastics, fabric washing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arranjo Molecular das Fibras.....	18
Figura 2. Classificação da pesquisa	33
Figura 3. Etapas metodológicas definidas para a execução da pesquisa.....	34
Figura 4. Fluxo de etapas a serem realizadas.....	35
Figura 5. LUPA CONTA-FIOS METAL LED SOLVER SLF-130M	38
Figura 6. Microscópio trinocular EXP 90	39
Figura 7. Mini maquina lavadora de roupas praxis Petit 1,2KG	40
Figura 8. Sistema de Filtragem	40
Figura 9. Sistema de filtragem	41
Figura 10. Microfiltro fibra de vidro GF-3	41
Figura 11. Ciclo da Máquina Petit	42
Figura 12. Procedimento para a Determinação de Valores P.....	45
Figura 13. Etapas da ACV.....	46
Figura 14. Ligamento do tecido de Poliamida.....	57
Figura 15. Estrutura tecido de Poliéster	58
Figura 16. Estrutura tecido de Algodão.....	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Análise de água das lavagens do Branco	61
Gráfico 2. Análise de água das lavagens da Poliamida	62
Gráfico 3. Análise de água das lavagens do Poliéster.....	63
Gráfico 4. Análise de água das lavagens do Algodão	63
Gráfico 5. Normalização Interna dos Tecidos (Algodão, Poliamida e Poliéster).	68
Gráfico 6. Melhor Caso - Inclusão da Categoria Efeitos Físicos na Biota no Endpoint de Ecosystem Quality para os Tecidos de Algodão, Poliamida e Poliéster.....	73
Gráfico 7. Caso Médio - Inclusão da Categoria Efeitos Físicos na Biota no Endpoint de Ecosystem Quality para os Tecidos de Algodão, Poliamida e Poliéster.....	74
Gráfico 8. Pior Caso - Inclusão da Categoria Efeitos Físicos na Biota no Endpoint de Ecosystem Quality para os Tecidos de Algodão, Poliamida e Poliéster.	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Denominação e descrição das fibras e filamentos têxteis.....	17
Quadro 2. Características do algodão.....	20
Quadro 3. Características do Poliéster.....	21
Quadro 4. Características da Poliamida.....	22
Quadro 5. Resumo das definições de objetivo e escopo da ACV	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Guia de Tamanhos Camisetas	47
Tabela 2. Inventário de dados para a fase uso do ciclo de vida do tecido poliéster ..	49
Tabela 3. Inventário de dados para a fase uso do ciclo de vida do tecido poliamida.	
	50
Tabela 4. Inventário de dados para a fase uso do ciclo de vida do tecido algodão. .	50
Tabela 5. Peso seco dos artigos	52
Tabela 6. Gramatura dos Artigos	53
Tabela 7. Regain dos tecido analisados.....	54
Tabela 8. Regain das Fibras.	55
Tabela 9. Número de fios por centímetro de Algodão (CO).....	55
Tabela 10. Número de fios por centímetro de Poliéster (PES).	56
Tabela 11. Número de fios por centímetro de Poliéster (PA).....	56
Tabela 12. Densidade Linear Trama Poliéster.	59
Tabela 13. Densidade Linear Urdume Poliéster.....	59
Tabela 14. Densidade Linear Trama Algodão.	59
Tabela 15. Densidade Linear Algodão Urdume.....	59
Tabela 16. Dados médios das Lavagens dos artigos	61
Tabela 17. Teste de hipótese.....	64
Tabela 18. Resultados da Análise de Impacto Ambiental Usando o Método de Avaliação de Impacto ReCiPe 2016 Midpoint (H).....	66
Tabela 19. Resultados da Análise de Impacto Ambiental Usando o Método de Avaliação de Impacto ReCiPe 2016 Endpoint (H)	70
Tabela 20. Dados filtragem do Poliéster.....	84
Tabela 21. Dados de Filtragem do Algodão	85
Tabela 22. Dados de Filtragem Poliamida.....	86
Tabela 23. Dados de Filtragem Branco	87

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 ARTIGOS TÊXTEIS	17
2.2 ARRANJO MOLECULAR DAS FIBRAS	18
2.2.1 Fibra de Algodão	19
2.2.2 Poliéster	20
2.2.3 Poliamida	21
2.3 IMPACTO AMBIENTAL DE POLÍMEROS TÊXTEIS	23
2.4 MICROPLÁSTICOS, NANOPLÁSTICOS E SEUS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO	25
2.5 MARILCA	27
2.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	28
2.6.1 Definição do objetivo e escopo.....	29
2.6.2 Análise do Inventário (ICV).....	30
2.6.3 Avaliação do impacto (AICV).....	31
2.6.4 Interpretação do ciclo de vida.....	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	33
3.2 ETAPAS DE PESQUISA.....	34
3.2.1 Artigos Têxteis definidos para estudo.....	34
3.2.2 Caracterização dos artigos têxteis.....	35
3.2.2.1 Definição da composição.....	36
3.2.2.2 Composição da peça.....	36
3.2.2.3 Peso seco.....	36
3.2.2.4 Gramatura do Tecido	36
3.2.2.5 Regain	37
3.2.2.6 Carreira e Colunas	37
3.2.2.7 Ligamento.....	38

3.2.2.8 Densidade linear.....	39
3.2.3 Planejamento experimental	39
3.2.3.1 Materiais e equipamentos utilizados para lavagem.....	40
3.2.3.2 Execução das lavagens	41
3.2.3.3 Filtragem do efluente	42
3.2.4 Análise Estatística	43
3.2.4.1 Teste de Hipótese	44
3.2.5 Avaliação do Ciclo de Vida dos Artigos Têxteis em Estudo	46
3.2.5.1 Definição de objetivo e escopo	46
3.2.6 Inventário do Ciclo de vida	49
3.2.7 Avaliação do impacto do ciclo de vida.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ARTIGOS.....	52
4.1.1 Peso seco da amostra.....	52
4.1.2 Gramatura do Tecido	53
4.1.3 Regain.....	54
4.1.4 Carreiras e Colunas	55
4.1.5 Ligamento	57
4.1.6 Densidade Linear	59
4.2 FILTRAGEM DO EFLUENTE	60
4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA COM TESTE T	64
4.4 RESULTADOS DOS INDICADORES DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	65
4.4.1 Resultados Usando o Método de Avaliação de Impacto ReCiPe2016 Midpoint (H)	65
4.4.2 Resultados Usando o Método de Avaliação de Impacto ReCiPe 2016 Endpoint (H)	69
5 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE 1 – TABELAS COM DADOS DE FILTRAGEM DO POLIÉSTER	84
APÊNDICE 2 – TABELAS COM DADOS DE FILTRAGEM DO ALGODÃO	85
APÊNDICE 3 – TABELAS COM DADOS DE FILTRAGEM DO POLIAMIDA	86
APÊNDICE 4 – TABELAS COM DADOS DE FILTRAGEM DO BRANCO.....	87

1 INTRODUÇÃO

O surgimento do plástico é atribuído a uma série de desenvolvimentos ao longo do século XIX. O primeiro marco significativo foi a descoberta do material celulóide por John Wesley Hyatt em 1869, que se tornou o primeiro plástico sintético comercialmente bem-sucedido. No entanto, foi a invenção do bakelite por Leo Baekeland em 1907 que realmente impulsionou a revolução dos plásticos. O bakelite, o primeiro plástico termofixo, era extremamente durável e resistente ao calor. Desde então, uma série de outros plásticos sintéticos foram desenvolvidos, cada um com suas próprias propriedades e aplicações únicas, transformando radicalmente a indústria e a sociedade como um todo (Crawford, 2009).

Além disto, a produção e o desenvolvimento de materiais poliméricos (plástico) possibilitaram diversas facilidades para o mundo moderno, entretanto, trouxeram consigo um enorme problema ambiental. Embora o plástico seja essencial para a sociedade moderna, as consequências a longo prazo desse uso intensivo ainda são amplamente desconhecidas. Microplásticos, com suas fontes, destino e efeitos, têm recebido crescente atenção tanto de especialistas da comunidade científica quanto de formuladores de políticas públicas e da sociedade em geral (Geyer; Jambeck; Law, 2017).

A crescente presença de microplásticos nos ambientes aquáticos configura-se como um desafio ambiental de proporções cada vez mais preocupantes. Seus impactos nos ecossistemas, tanto pela ingestão por organismos marinhos quanto pela liberação de substâncias tóxicas, exigem uma investigação profunda e abrangente, abarcando os diversos aspectos dessa problemática (Alves, 2017).

Estima-se que desde meados do século passado, quando a produção industrial de plásticos começou, tenham sido fabricadas cerca de 8,9 bilhões de toneladas de plásticos primários (novos) e secundários (reciclados). Destes, aproximadamente 6,3 bilhões de toneladas foram descartadas como resíduos, enquanto 2,6 bilhões de toneladas ainda estão em uso (Geyer; Jambeck; Law, 2017). Esses dados reforçam a magnitude do problema, evidenciando que a maior parte do plástico produzido não retorna para ciclos de reutilização e permanece no ambiente sob a forma de resíduos de longa persistência.

O descarte de plásticos tem aumentado proporcionalmente à sua produção. Esse tipo de resíduo não sofre degradação biológica, apenas degradação mecânica,

o que faz com que os plásticos maiores sofram fragmentação lenta e progressiva até tornarem-se minúsculas partículas que se depositam em praticamente todos os ambientes naturais. Além disto, itens plásticos dos mais variados tamanhos podem ser encontrados tanto em áreas costeiras urbanas, como em ilhas remotas e desertas no meio de oceanos, ou mesmo flutuando em mar aberto (Moore, 2008).

Além dos microplásticos gerados de macroplásticos, estes oriundos muitas vezes de resíduos de plásticos descartados, ainda existe a liberação de microplásticos no ambiente através do uso dos produtos plásticos, e das ações mecânicas realizadas sobre eles, como o atrito, o choque, dentre outros. Um destes tipos de microplásticos são as microfibras, provenientes de têxteis e vestuário. Essas microfibras são emitidas tanto na forma de poeira quanto em processos de desgaste e manutenção. Em relação à poeira, estudos sobre a qualidade do ar relatam a presença de fibras, especialmente em locais fechados, derivados de artigos de vestuário, cortinas, carpetes entre outros. Estas partículas, removidas por ações de limpeza ou quando atritadas, são liberadas em efluentes de esgoto ou diretamente transportadas pelo ar, dissipando para áreas externas (Cesa, 2017).

Em específico, em relação aos efluentes domésticos, as águas de lavagem de roupas são direcionadas para estações de tratamento de esgoto, podendo ter parte das emissões de microfibras retidas nos lodos dos sistemas de tratamento. No entanto, uma parcela importante destas microfibras acaba passando pelos sistemas de tratamento e sendo liberadas em corpos hídricos receptores, podendo atingir níveis de lançamento acima de 1770 partículas por hora (ou aproximadamente 0,009 partículas/L) (Almroth, 2018).

As microfibras liberadas no ambiente são consideradas poluentes emergentes que geram impactos ambientais. Sabe-se que aproximadamente 2 milhões de toneladas de microfibras são lançadas no oceano todos os anos a partir de várias fontes, das quais, sendo que as microfibras têxteis são os maiores contribuintes desta poluição, dado que cerca de 13 milhões de toneladas de resíduos de tecido sintético costeiro entram no oceano a cada ano e 2,5 milhões de toneladas entram em rios adjacentes. Estima-se que até 2019, 1,5 quatrilhão de microfibras estejam presentes no oceano (Mishra, 2019).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) consiste em uma ferramenta essencial para a avaliação dos impactos ambientais potenciais de produtos e serviços ao longo de todas as suas etapas, desde a extração de matérias-primas até o descarte final.

Essa técnica permite identificar em quais fases do ciclo ocorrem os maiores impactos, fornecendo subsídios para a adoção de práticas mais sustentáveis e decisões baseadas em evidências. No contexto da poluição causada por microplásticos e microfibras, a aplicação da ACV possibilita quantificar os efeitos ambientais associados à produção, uso e lavagem de tecidos sintéticos, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias voltadas à redução desses impactos (Guinée *et al.*, 2011; Klöpffer e Grahl, 2014).

Desta forma, considerando o exposto, tem-se a seguinte pergunta de pesquisa: Quais são os impactos ambientais potenciais oriundos do processo de lavagem de roupas, considerando a liberação de microfibras têxteis?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do presente estudo é avaliar comparativamente os impactos ambientais potenciais da lavagem de tecidos de algodão, poliamida e poliéster, considerando os impactos ambientais da liberação de microfibras na lavagem.

1.1.2 Objetivos específicos

O presente estudo considera os seguintes objetivos específicos:

- Identificar a liberação de microfibras têxteis na lavagem dos três tipos de tecidos;
- Quantificar o desprendimento de microfibras têxteis em lavagens domésticas para cada tipo de tecido analisado;
- Quantificar os impactos ambientais potenciais do processo de lavagem dos três tecidos através da técnica de ACV.

1.2 JUSTIFICATIVA

A poluição do ambiente marinho por plásticos é uma realidade imposta à comunidade internacional. Essa forma de poluição é principalmente ocasionada pelos resíduos plásticos gerados pelas atividades humanas, sendo uma consequência do

atual modelo de produção e consumo adotado pela sociedade moderna. A disseminação dos plásticos em várias esferas da atividade humana e o aumento crescente de sua utilização estão diretamente ligados ao fenômeno da poluição marinha por plásticos. Nas últimas décadas, tem sido observado que uma quantidade cada vez maior desse material, de diferentes tamanhos, alcança os oceanos. Uma vez no ambiente marinho, os plásticos sofrem os efeitos da degradação química e acabam se fragmentando em microplásticos. Por serem leves e persistentes, são encontrados flutuando em todos os oceanos do mundo, seja na superfície, na coluna de água ou depositados no leito marinho, com sua presença também detectada nas praias. Os detritos plásticos causam impactos ambientais, econômicos, sociais e à saúde humana (Silva, 2013).

A contaminação por microfibras é originada de diversas fontes, como a lavagem de roupas em residências, atividades da indústria têxtil, locais de despejo próximos a corpos d'água, escoamento de águas residuais e o descarte direto de roupas em rios e mares. Essas partículas representam uma ameaça ao ambiente, pois têm o potencial de infiltrar-se na cadeia alimentar marinha. Devido ao seu tamanho diminuto, os animais aquáticos, como peixes e crustáceos, frequentemente ingerem essas microfibras, que se acumulam em seus sistemas digestivos. Esse fenômeno resulta em impactos prejudiciais para a vida marinha, especialmente para as espécies que dependem desses organismos como fonte de alimento (Vanrullen, 2019).

A quantificação dos impactos ambientais decorrentes da presença de microplásticos tem encontrado na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) uma ferramenta promissora, capaz de mensurar e interpretar os efeitos desses poluentes sobre os ecossistemas terrestres e marinhos (Coelho, 2020). Contudo, a incorporação dos microplásticos em estudos de ACV ainda é limitada, em razão de diversos fatores. Entre eles, destaca-se a falta de dados consistentes e padronizados sobre sua ocorrência, transporte e consequências ambientais, o que dificulta a representação precisa desses impactos nos modelos de avaliação (Zhang *et al.*, 2023). Somado a isso, a complexidade dos mecanismos de degradação e a variabilidade dos efeitos entre diferentes ambientes tornam desafiadora a construção de fatores de caracterização específicos (Lee *et al.*, 2024).

Atualmente, grande parte das pesquisas ainda se concentra na detecção e descrição das partículas plásticas, em vez de abordar suas implicações em uma perspectiva integrada de ciclo de vida (Garcia *et al.*, 2025).

Neste sentido, a lacuna a ser preenchida por este estudo trata da junção da abordagem experimental para a identificação de quantidade de microfibras têxteis liberadas nos processos de lavagem e o uso da ferramenta de ACV para a quantificação dos impactos potenciais ambientais desta liberação, bem como dos demais fluxos ambientais existentes nos processos de lavagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ARTIGOS TÊXTEIS

O entendimento preciso dos termos e conceitos é fundamental para a aplicação eficaz de regulamentos técnicos no setor têxtil. Conforme a *Resolução Normativa Nº 213*, do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO, 2010), um produto têxtil é caracterizado pela sua composição exclusiva de fibras têxteis ou filamentos têxteis, em diferentes estágios de processamento, desde o estado bruto até o confeccionado.

Essas fibras podem ter origem variada, seja vegetal, animal, mineral, artificial ou sintética, sendo sua adequação para aplicações têxteis determinada por uma combinação de características físicas como comprimento, diâmetro, flexibilidade, suavidade, elasticidade, resistência, tenacidade e finura. A compreensão precisa desses conceitos é essencial para garantir a conformidade e qualidade dos produtos têxteis no mercado (Vasconcelos, 2019). No Quadro 1 é possível observar as principais descrições dos artigos têxteis, permitindo a comparação entre as fibras em questão.

Quadro 1. Denominação e descrição das fibras e filamentos têxteis.

Denominação	Descrição das fibras
Algodão	Fibra proveniente das sementes de plantas de algodão (<i>Gossypium sp</i>).
Poliamida	Fibra formada de macromoléculas lineares sintéticas que têm em sua cadeia a repetição de grupos funcionais amidas unidas em, no mínimo 85% a radicais alifáticos, aromáticos ou ambos.
Poliéster	Fibra formada de macromoléculas lineares que apresentam em sua cadeia um ester de diol ácido tereftálico, pelo menos, em 85%em massa.

Fonte: Conmetro (2008)

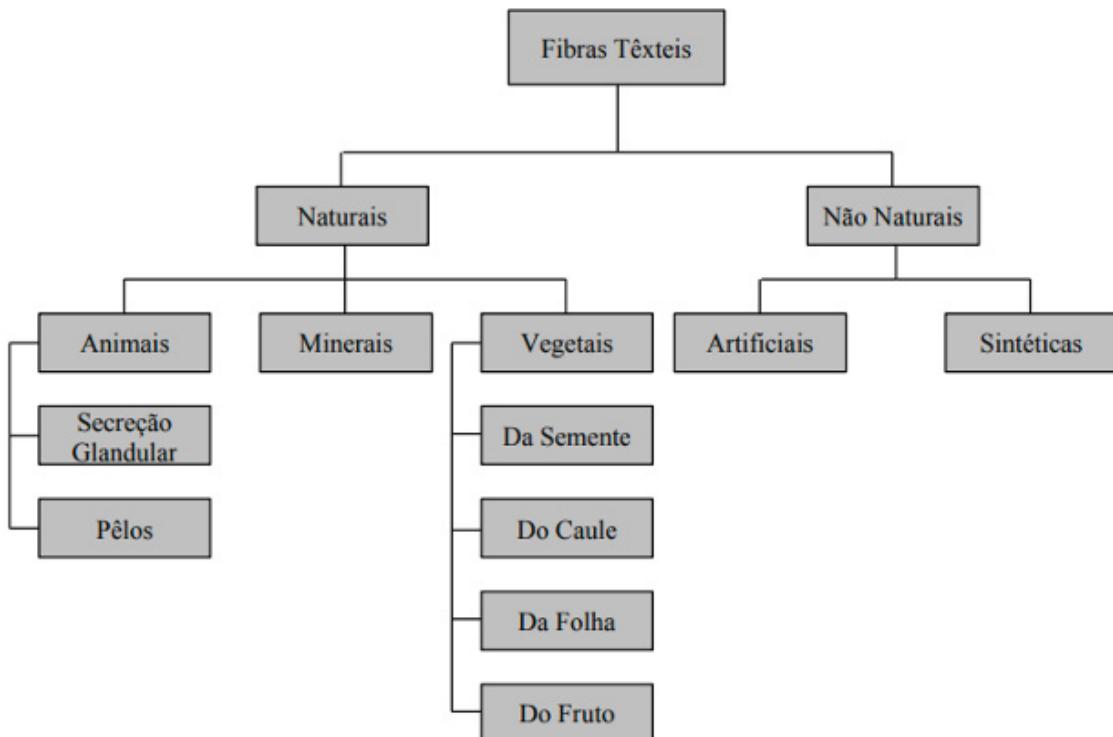
2.2 ARRANJO MOLECULAR DAS FIBRAS

As fibras têxteis, sejam elas de origem natural ou sintética, constituem os blocos de construção fundamentais para a indústria têxtil. A forma como suas moléculas se organizam desempenha um papel determinante na definição das propriedades físicas e mecânicas dessas fibras, tais como resistência, elasticidade, capacidade de absorção de umidade e durabilidade (Kuasne, 2008).

As fibras têxteis podem ser classificadas em duas categorias principais: fibras naturais e fibras não naturais ou sintéticas (Figura 1).

As fibras naturais, como algodão, lã e seda, são obtidas diretamente da natureza, enquanto as fibras sintéticas, como poliéster e nylon, são fabricadas pelo homem através de processos químicos. Cada tipo possui características únicas em termos de origem, composição química, propriedades e impacto ambiental (Smith, 2023). Na sequência, são detalhadas nas seções 2.2.1 à 2.2.3 as fibras de algodão, poliéster e poliamida, que são foco deste estudo.

Figura 1. Arranjo Molecular das Fibras



Fonte: Kuasne (2008)

2.2.1 Fibra de Algodão

O algodão, uma fibra natural amplamente utilizada na indústria da moda para a confecção de tecidos, é derivado da planta do algodoeiro. Pertencente à família das *Malvaceae*, a mesma que inclui o quiabo, cacau e o hibisco. O algodão, planta do gênero *Gossypium*, produz fibras que são colhidas e transformadas em fios para a tecelagem. Sua versatilidade, conforto e respirabilidade o tornam uma escolha popular tanto para roupas casuais quanto para peças de alta moda (Ecycle, 2023).

A safra de algodão 2023/24 se encerrou com resultados históricos, superando as projeções iniciais e consolidando-se como um marco para a cotonicultura brasileira. O 12º e último Levantamento da Safra 2023/24 da Conab (Companhia Nacional de Abastecimento), divulgado em setembro, confirmou uma produção recorde de 3,65 milhões de toneladas de pluma. Esse volume foi um reflexo direto do aumento de 16,9% na área de plantio em comparação com o ciclo anterior. Contudo, observou-se uma queda de 3,6% na produtividade em relação ao ciclo passado, atribuída a fatores como o fenômeno El Niño, que impactou o rendimento da pluma de algodão (Syngenta, 2023; Conab, 2024). Olhando para o futuro, as perspectivas permanecem positivas: as estimativas para a safra 2024/25 da Abrapa e Conab indicam um novo recorde, com projeções que variam entre 3,93 a 3,96 milhões de toneladas de pluma. Esse crescimento futuro é sustentado por um aumento projetado na área plantada, que deve ultrapassar 2,1 milhões de hectares, demonstrando a confiança do setor na manutenção da cotonicultura brasileira em patamares de alta produtividade e na liderança global (Abrapa, 2025; Conab, 2025).

O algodão apresenta características físico-químicas que influenciam diretamente seu uso em diferentes aplicações têxteis. Conforme detalhado no Quadro 2, a fibra de algodão (*Gossypium sp.*) possui boa resistência ao calor e à luz solar, decompõe-se em ácidos e reage positivamente à Mercerização, o que aumenta o brilho e a resistência do material. Essas propriedades tornam o algodão adequado para confecção de roupas, cortinas e lençóis, destacando sua versatilidade na indústria têxtil (Senai CETIQT, 2015).

Quadro 2. Características do algodão.

Símbolo	Nome	Características	Comportamento térmico	Comportamento em relação a diversos agentes	Aplicações
CO	Algodão	Fibra procedente das sementes do algodoeiro (<i>Gossypium sp.</i>)	Temperatura de decomposição: 180°C	Ao calor: Boa resistência. Amarela após 5 h a 120°C. À luz solar: Boa resistência. Aos ácidos: Decompõe-se em ácidos concentrados a frio e a quente. Aos álcalis: Intumesce em soda cáustica acima de 18°Be (mercerização), com aumento de brilho e resistência. Aos solventes orgânicos: Resistente. Ao mofo: Não é resistente	Confecção; Cortinas; Roupas domésticas; Lenços.

Fonte: Senai CETIQT (2015)

2.2.2 Poliéster

O poliéster é uma classe de polímeros que, quimicamente, possui um grupo funcional éster na sua cadeia principal. Embora haja uma diversidade de poliésteres, o termo comumente refere-se ao politereftalato de etileno, conhecido como PET. A maioria dos poliésteres sintéticos não é biodegradável, embora existam versões modificadas ou de origem biológica que podem apresentar alguma biodegradabilidade. Essas versões são projetadas para se decompor ao final de seu ciclo de vida útil, permitindo que se quebrem em componentes não tóxicos no ambiente (Wang *et al.*, 2024). A descoberta do PET remonta a 1941, quando os químicos britânicos John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, enquanto trabalhavam na Calico Printer's Association em Manchester (Inglaterra), patentearam o composto, impulsionados pela pesquisa de Wallace Carothers. Desde então, o PET se tornou a base de diversas fibras sintéticas, incluindo o poliéster. Durante a década de 1960, a produção de fibras manufaturadas, incluindo as de poliéster, acelerou-se

significativamente devido a contínuas inovações no mercado, representando cerca de 30% do consumo de fibras nos Estados Unidos (The Inventors, 2025).

As características físico-químicas que influenciam diretamente seu uso em diferentes aplicações têxteis segue Quadro 3.

Quadro 3. Características do Poliéster.

Símbolo	Nome	Características	Comportamento térmico	Comportamento em relação a diversos agentes	Aplicações
PES	Poliéster	Fibra formada por macromoléculas lineares cuja cadeia é constituída por no mínimo 85% da sua massa de éster de um díol e ácido tereftálico	Temperatura de amolecimento: 230°C; Temperatura de fusão: 250 a 260°C; Temperatura para passar a ferro: 165 a 185°C	<p>Ao Calor: Amolece a 205°C; em tecidos com microfibra amolece à temperatura mais baixa.</p> <p>À luz solar: Boa resistência</p> <p>Aos ácidos: Resistente à maioria dos ácidos minerais</p> <p>Aos álcalis: Boa resistência a frio. À ebulição se desintegra com álcalis fortes.</p> <p>Aos solventes orgânicos: Geralmente não é afetado. É solúvel em alguns compostos fenólicos.</p> <p>Ao mofo: Excelente resistência.</p>	<p>Malhas, vestuários, só em misturas com outras fibras; tecidos finos para gravata, lençóis e tecidos para forros; Cortinas, tapeçarias e decorações; Enchimento para almofadas, colchas e sacos de dormir; Aplicações industriais e pneumáticas</p>

Fonte: Senai CETIQT (2015)

2.2.3 Poliamida

Após os avanços nos poliésteres, houve um foco crescente nas poliamidas, resultando em uma rápida expansão da polimerização desses novos compostos - mais de cem tipos diferentes de poliamidas foram desenvolvidos nesse período. Em 1934, os pesquisadores da DuPont escolheram a poliamida 66, apesar de seu alto ponto de fusão, devido às suas notáveis qualidades, como alta velocidade de cristalização e uma significativa porcentagem da porção cristalina. Essa escolha destacou-se como um marco importante na evolução dos polímeros e na indústria têxtil, delineando um novo capítulo na busca por materiais avançados (Alves, 2012).

A primeira poliamida foi sintetizada pelo químico norte-americano Wallace Hume Carothers, enquanto estava envolvido em pesquisas na empresa multinacional americana DuPont. Essa conquista representou um avanço significativo na história dos materiais sintéticos, marcando o desenvolvimento pioneiro de uma fibra útil por meio da síntese química de compostos acessíveis. O sucesso dessa descoberta estimulou consideravelmente o progresso subsequente na pesquisa e manufatura de polímeros, abrindo caminho para uma nova era de inovação na indústria de materiais (Silva, 2014). As características físico-químicas que influenciam diretamente seu uso em diferentes aplicações têxteis segue Quadro 4.

Quadro 4. Características da Poliamida.

Símbolo	Nome	Características	Comportamento térmico	Comportamento em relação a diversos agentes	Aplicações
PA	Poliamida	Fibra formada por macromoléculas lineares cuja cadeia apresenta uma repetição do grupo funcional amida.	Temperatura de amolecimento: PA 6 200°C e PA 6.6 230°C; Temperatura de fusão: PA 6 215 a 220°C e PA 6.6 180°C; Temperatura para passar a ferro: PA 6 155°C e PA 6.6 180°C.	Ao calor: PA 6 - funde entre 215 e 220°C. PA 6.6 - amolece a 210°C. Funde entre 250 e 255°C. À luz solar: Boa resistência. Aos ácidos: Baixa resistência aos ácidos fracos. Decompõe-se em ácidos fortes. Aos álcalis: Boa resistência. Aos solventes orgânicos: Resistente em alguns solventes, mas solúvel em compostos fenólicos. Ao mofo: Excelente resistência.	Meias Masculinas e femininas; Artigos esportivos e de praia; Lingeries, rendas; Roupas esportivas; Tapeçaria e carpetes; Revestimento para indústria automobilística; Fibra de reforço mescla, com lã e fibras acrílicas.

Fonte: Senai CETIQT (2015)

Por fim, pode-se dizer que os avanços na indústria têxtil, embora tenham proporcionado uma ampla gama de opções e benefícios para os consumidores, também têm gerado impactos significativos no meio ambiente. Desde o cultivo do algodão até a produção de fibras sintéticas como o poliéster e a poliamida, cada etapa do processo contribui para a degradação ambiental, seja por meio do uso intensivo de recursos naturais, da poluição do ar e da água ou do descarte inadequado de

resíduos. Diante desse cenário, é crucial que a indústria têxtil adote práticas mais sustentáveis e busque alternativas ecologicamente conscientes em todas as fases da cadeia de produção (WWF, 2020).

2.3 IMPACTO AMBIENTAL DE POLÍMEROS TÊXTEIS

O conceito de impacto ambiental abrange uma vasta gama de mudanças nas características do meio ambiente decorrentes das atividades humanas, influenciando aspectos como saúde pública, economia, biodiversidade e qualidade dos recursos naturais. A avaliação desses impactos é essencial para garantir uma gestão ambiental eficaz, permitindo uma análise criteriosa dos efeitos de ações propostas e suas alternativas. Embora a avaliação de impactos ambientais seja uma ferramenta valiosa para o processo decisório em projetos e políticas, ainda há desafios a serem enfrentados, especialmente quando se trata de avaliar os impactos de atividades repetitivas ou contínuas, como as práticas agrícolas (Spadotto, 2002).

A indústria têxtil é amplamente reconhecida como uma das mais poluentes do mundo, devido a uma série de fatores. Estes incluem o uso de produtos químicos prejudiciais, o elevado consumo de água e energia, a geração significativa de resíduos sólidos e gasosos, além do considerável uso de combustíveis para o transporte de materiais e a utilização de embalagens frequentemente não biodegradáveis (Mercia, 2016). A preocupação crescente com os impactos ambientais causados pela indústria têxtil tem despertado a atenção de especialistas e ativistas ambientais em todo o mundo. De acordo com pesquisadores americanos, estima-se que desde a popularização do poliéster e do náilon na década de 1950, cerca de 5,6 milhões de toneladas de microplásticos tenham sido geradas a partir de roupas contendo fibras sintéticas. Estudos realizados pela equipe da Universidade da Califórnia em Santa Bárbara (UCSB) revelaram que as emissões anuais de microplásticos para o ambiente terrestre já ultrapassaram as destinadas aos corpos d'água, sinalizando uma tendência alarmante. Esse cenário ressalta a significativa contribuição das fibras sintéticas para a poluição plástica global, uma vez que aproximadamente 14% de todo o plástico produzido é utilizado na fabricação de roupas. A cada lavagem dessas peças, microfibras são liberadas no ambiente, exacerbando ainda mais a contaminação ambiental e reforçando a urgência de ações para mitigar esse problema (BBC NEWS BRASIL, 2022).

O algodão, uma fibra vegetal de origem natural, destaca-se por sua notável capacidade de biodegradação em comparação com as fibras sintéticas. Enquanto o nylon e o poliéster podem persistir no ambiente por décadas ou até mesmo séculos, estima-se que o algodão se decomponha completamente em apenas alguns meses, variando de 1 a 5 meses em condições naturais. Além disso, o potencial de aproveitamento do algodão é alto, permitindo que cada parte da planta seja utilizada de maneira eficiente em diversos setores, desde a indústria têxtil até a produção de óleo de algodão, alimentação animal, fabricação de alimentos, combustível, higiene pessoal, tintas, papel-moeda e sementes para novas safras. Essa característica de biodegradabilidade do algodão possui relevância ambiental, pois quando os produtos feitos desse material são descartados corretamente, seja por compostagem ou em aterros sanitários apropriados, eles podem se decompor naturalmente, contribuindo para a redução do acúmulo de resíduos têxteis e para a preservação dos ecossistemas e da biodiversidade (Handz, 2023).

A produção de poliéster, derivado do petróleo, enfrenta desafios significativos em termos de sustentabilidade, uma vez que a extração da matéria-prima está associada a danos ambientais consideráveis. Além disso, o processo de fabricação do poliéster requer quantidades substanciais de água para resfriamento, juntamente com o uso extensivo de produtos químicos nocivos, como lubrificantes, que podem se tornar fontes de contaminação se não forem adequadamente tratados. Outra questão ambiental preocupante relacionada ao poliéster é a liberação de microplásticos durante os ciclos de lavagem das roupas, o que pode afetar negativamente os ecossistemas aquáticos. Esses microplásticos são ingeridos por organismos marinhos e podem se propagar pela cadeia alimentar, chegando até mesmo aos seres humanos. Estudos recentes demonstram que uma única lavagem de uma peça de vestuário de poliéster pode liberar uma quantidade significativa de microfibras, que acabam sendo transportadas pela água até os corpos d'água e oceanos, contribuindo para a poluição desses ambientes (Ecycle, 2023).

A produção de poliamida, embora tenha suas vantagens, também acarreta uma série de desafios ambientais. Entre os subprodutos gerados durante o processo de fabricação estão a água, o ácido clorídrico e o óxido nitroso, um gás de efeito estufa. Apesar de ser amplamente utilizado na indústria automobilística devido à sua leveza, que permite a redução do peso dos veículos e, consequentemente, economiza

combustível, a poliamida, como tecido sintético, pode desencadear reações alérgicas em algumas pessoas (Mishra, Rath e Dass, 2019).

Embora os resíduos da produção possam ser reaproveitados na fabricação de plásticos, a poliamida ainda enfrenta desafios significativos em termos de consumo de recursos naturais, como a água. Estima-se que sejam necessários cerca de 700 litros de água por quilo de poliamida produzida, tornando evidente a importância de se buscar alternativas mais sustentáveis na produção desse material (Legnaioli, 2021).

2.4 MICROPLÁSTICOS, NANOPLÁSTICOS E SEUS PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO

Os microplásticos são definidos como partículas plásticas sólidas, podendo ser classificados como primários e secundários e são definidos como partículas de dimensões < 5mm (Thompson, 2004).

Os microplásticos primários podem ser encontrados em vários segmentos bem como os de higiene e limpeza, já os secundários formam-se no ambiente a partir de fragmentos de maiores dimensões, devido a processos de erosão, abrasão e biodegradação (Costa, Duarte e Rocha Santos, 2019).

Quando se fala em microplásticos em tecidos, existem discussões na literatura sobre a classificação de microfibras liberadas em lavagens e secagens domésticas. Por mais que essas fibras apresentem dimensões inferiores às definidas por microplásticos, elas se originam pela fragmentação de fibras maiores, sendo considerada por alguns autores como microplásticos secundários. Estima-se que cada ciclo de lavagem libera centenas de microfibras sintéticas, e sistemas convencionais de tratamento de efluente são insuficientes na retenção dessas fibras (Costa, Duarte e Rocha Santos, 2019).

Apesar de existir consenso na definição de microplásticos, o conceito de nanoplásticos ainda é discutido na literatura. Alguns autores definem como partículas menores que 1µm, outros adotam o critério utilizado pela União Europeia, considerando nanoplásticos aqueles com pelo menos duas dimensões inferiores a 100 nanômetros (Costa, Duarte e Rocha Santos, 2019).

A ampla detecção e a facilidade de disseminação de microplásticos (MPs) e nanoplásticos (NPs) revelam a abrangência da contaminação, agravando a situação

ambiental e de saúde (Bugatti *et al.*, 2023). Um estudo de Fonseca *et al.* (2022) corrobora essa preocupação, ao abordar a poluição plástica marinha e a necessidade de estratégias de gerenciamento. Essas partículas já foram identificadas em diversos compartimentos, desde corpos marinhos até alimentos e bebidas de consumo humano, como cerveja, energéticos e refrigerantes. Mais preocupante ainda é a constatação da presença de microplásticos na placenta humana e no leite materno, levantando-se grande alerta em relação a população de bebês, extremamente vulnerável, dado o pouco conhecimento sobre o problema e o potencial de danos futuros. A possibilidade de transferência desses compostos ao longo da cadeia alimentar demonstra que quanto mais cedo o contato com tal material, mais elevado pode ser o acúmulo dessas substâncias no organismo, elevando os riscos à saúde das futuras gerações. Desse modo, um maior entendimento acerca da relação entre tais fragmentos plásticos e a saúde humana ainda é incipiente, e a realização de novos estudos mostra-se necessária para um conhecimento mais aprofundado no que diz respeito ao impacto dos MPs e dos NPs na saúde (Bugatti *et al.* 2023).

A compreensão da degradação polimérica figura como um pilar essencial para desvendar o ciclo de vida e o destino ambiental dos materiais plásticos. Os conceitos fundamentais que regem esse processo, seus diversos mecanismos e os fatores que os influenciam são amplamente discutidos e sistematizados, conforme a abrangente revisão conduzida por Lima, Moreira e Araujo (2022). A degradação polimérica é essencialmente definida pelas transformações químicas que, de modo adverso, alteram as propriedades intrínsecas de um material.

A degradação de um material polimérico dificilmente ocorre de forma isolada. Na maioria dos cenários, ela é resultado da ação combinada de diversos fatores favoráveis a degradação polimérica. Essa complexidade leva à categorização de múltiplos processos degradativos, entre os quais se incluem a fotodegradação, degradação termo-oxidativa, termomecânica, térmica, e também a biológica e enzimática, para citar algumas (Lima, Moreira e Araujo, 2022).

Além dos processos degradativos que operam independentemente da ação de microrganismos, há uma área significativa de estudos focados na degradação biológica. De forma geral, a biodegradação é impulsionada pela atividade de microrganismos presentes na superfície do material. Essa camada biológica é responsável por induzir alterações estruturais ou morfológicas no polímero (Lima, Moreira e Araujo, 2022).

Diante da urgência dos impactos ambientais de microplásticos (MPs) e nanoplásticos (NPs) ao longo do ciclo de vida de produtos plásticos, e considerando que o tema ainda se encontra em desenvolvimento na literatura científica, modelos inovadores tornam-se cruciais. Nesse contexto, o projeto MARILca se destaca como uma iniciativa relevante, a qual é abordada no próximo tópico.

2.5 MARILCA

O Grupo de trabalho internacional MariLCA foi estabelecido no final de 2018, contando com o apoio de organizações como a Iniciativa do Ciclo de Vida (ou *Life Cycle Initiative – LCI*) da ONU e o Fórum para a sustentabilidade por meio da Inovação do Ciclo de Vida (FSLCI). Ele foi criado para padronização de abordagens que permitam uma avaliação mais precisa e abrangente dos impactos ambientais potenciais de microplásticos (Alonso-Serra *et al.*, 2023).

O projeto MariLCA desenvolveu fatores de caracterização (FCs) específicos para microplásticos. Esses FCs foram elaborados para quantificar os efeitos físicos diretos dos microplásticos na biota aquática. A abrangência dos FCs do MariLCA é notável, cobrindo onze tipos de polímeros, três formas de partículas e cinco faixas de tamanho. O projeto visa expandir esses FCs para diferentes tamanhos de plásticos (macro, micro e nano) em diversos compartimentos ambientais (marinho, água doce, terrestre e ar) (Alonso-Serra *et al.*, 2023; MariLCA, 2025, Tang *et al.*, 2022).

A influência do MariLCA estende-se significativamente ao campo da tomada de decisões ambientais, provendo uma base científica sólida para a comparação e a gestão dos impactos ambientais potenciais dos microplásticos. Sua relevância abrange múltiplos segmentos industriais, como têxtil, embalagens e cosméticos, sendo igualmente valioso na orientação de ações e regulamentações governamentais. Esta iniciativa demonstra um compromisso contínuo com o avanço, projetando futuras expansões que visam incluir não apenas os MNPs, mas também outras formas de resíduos plásticos, ampliando assim seu horizonte de avaliação (Alonso-Serra *et al.*, 2023; MariLCA, 2025).

2.6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) emerge como uma poderosa ferramenta para a análise e compreensão do impacto ambiental associado a produtos e atividades ao longo de seu ciclo de vida. Além de identificar os estágios que mais contribuem para esse impacto, a ACV permite avaliar possíveis melhorias e alternativas para produtos, processos ou serviços, possibilitando a tomada de decisões mais sustentáveis. Originados na década de 60, em resposta à crise do petróleo e às preocupações crescentes sobre a exploração de recursos naturais finitos, os primeiros estudos de ACV tinham como foco principal o cálculo do consumo de energia, sendo denominados "análise de energia". Esses estudos evoluíram para uma abordagem mais abrangente, incorporando aspectos como o consumo de matérias-primas, combustíveis e a geração de resíduos sólidos, o que ampliou sua relevância para além do âmbito energético, sendo também referidos como "análise de recursos" ou "análise do perfil ambiental". Embora o interesse por estudos de ACV tenha diminuído após a crise do petróleo, seu ressurgimento na década de 80, impulsionado pelo crescente interesse ambiental, consolidou-se a partir da década de 90 com a normalização proporcionada pelas normas ISO 14040. Desde então, os estudos de ACV têm experimentado um crescimento contínuo, refletido no aumento do número de publicações, conferências e congressos dedicados ao tema, destacando sua importância como uma ferramenta fundamental para a gestão ambiental e a promoção da sustentabilidade (CETEA-UFRGS, 2014).

A ACV, conforme descrito por Caldeira-Pires *et al.* (2005), é um processo abrangente que visa examinar os impactos ambientais de um produto, processo, serviço ou atividade econômica ao longo de toda a sua vida útil. Essa análise não apenas identifica áreas para aprimoramento do desempenho ambiental, mas também pode influenciar mudanças tecnológicas substanciais, tanto na produção quanto nos produtos em si. A ACV é uma ferramenta científica qualitativa e quantitativa que avalia cada estágio do ciclo de vida e os diferentes impactos ambientais associados, permitindo a identificação e interpretação de aspectos relevantes ao longo do processo. Além disso, ela desempenha um papel crucial na tomada de decisões, tanto para empresas quanto para governos e organizações não governamentais, ao fornecer informações essenciais sobre o consumo de recursos, emissões de poluentes e estratégias de marketing. Ao incentivar a implementação bem-sucedida

da metodologia de ACV, as indústrias são encorajadas a considerar as implicações ambientais de suas práticas de produção, visando integrar a qualidade tecnológica do produto com preocupações ambientais, agregando valor aos olhos do consumidor (Silva, 2015).

A diversidade de resultados em estudos de ACV, apesar de suas semelhanças superficiais, evidencia a influência de uma série de variáveis críticas, como fronteiras adotadas, idade dos dados, tecnologias empregadas e logística de abastecimento de matérias-primas e energia. Essas considerações são fundamentais para os parâmetros inventariados e podem levar a conclusões discrepantes sobre qual sistema é mais adequado para o meio ambiente. Mesmo com essas restrições, estudos comparativos têm sido divulgados e impactam o mercado de produtos concorrentes. Diante desse cenário, tornou-se imperativa a padronização da metodologia de ACV. A SETAC - *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* - foi uma das principais instituições a abordar essa necessidade, reunindo pesquisadores líderes na área em diversas conferências internacionais entre 1990 e 1993. Desse esforço, surgiu o documento SETAC *Guidelines for Life Cycle Assessment - a Code of Practice* (CONSOLI *et al.*, 1993), o primeiro a propor uma padronização da metodologia de ACV e que serviu de base para os trabalhos de normalização internacional pela ISO - *International Organization for Standardization*. Esse processo envolveu mais de 300 especialistas de cerca de 29 países, resultando na série de normas ISO 14040 relacionadas à ACV (CETEA-UFRGS, 2014).

De acordo com a norma NBR ISO 14044 (ABNT NBR ISO 14040, 2009), em conformidade com a ISO14040, a mesma estabelece os requisitos e oferece diretrizes para a ACV, abrangendo desde a definição do objetivo e escopo da ACV até a comunicação e análise crítica dos resultados. Engloba as fases de Objetivo e escopo, análise do Inventário do ciclo de vida (ICV), Avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV), e interpretação do ciclo de vida, além de abordar as limitações da ACV, a relação entre suas fases e as condições para escolha de valores e elementos opcionais. As fases da ACV são detalhadas na seção 2.6.1.

2.6.1 Definição do objetivo e escopo

Na fase de definição de objetivos, são estabelecidos os principais motivos para a realização do estudo, sua amplitude e o público-alvo ao qual os resultados se

destinam. Enquanto na definição do escopo, aspectos metodológicos essenciais são considerados, incluindo o estabelecimento de parâmetros como função, unidade funcional e fluxo de referência do produto, a definição de fronteiras, critérios para alocação de cargas ambientais e as categorias de impacto a serem utilizadas. No estabelecimento do escopo, é crucial considerar aspectos geográficos, temporais e tecnológicos do sistema de produto, para refinar as fronteiras e selecionar as informações a serem utilizadas no inventário. Simplificadamente, a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009) estabelece que o escopo de um estudo de ACV deve abordar três dimensões essenciais: onde iniciar e encerrar o estudo do ciclo de vida (a extensão), quantos e quais subsistemas incluir (a abrangência) e o nível de detalhamento do estudo (a profundidade) (IPEN, 2023).

Ao iniciar uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), é crucial estabelecer com clareza o escopo do estudo, o qual abrange uma série de elementos fundamentais. Estes incluem a definição do sistema de produto a ser analisado, as funções desse sistema ou, em casos de comparação entre sistemas, das funções comparadas, além da determinação da unidade funcional e da fronteira do sistema. Também é essencial considerar os procedimentos de alocação, a metodologia de AICV e os tipos de impactos a serem avaliados. Outros aspectos a serem abordados são a interpretação a ser adotada, os requisitos de dados, pressupostos, escolhas de valores e elementos opcionais, bem como limitações e requisitos de qualidade dos dados. A possibilidade de revisão do objetivo e escopo do estudo devido a limitações não previstas ou informações adicionais também deve ser levada em conta, sendo crucial documentar tais modificações juntamente com suas justificativas. Esses elementos formam a base para uma ACV robusta e abrangente, contribuindo para a precisão e confiabilidade dos resultados obtidos (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

2.6.2 Análise do Inventário (ICV)

Na segunda fase da metodologia da ACV, conhecida como análise de inventário, ocorre a coleta e a quantificação meticulosa de uma ampla gama de variáveis relacionadas ao ciclo de vida do produto, processo ou atividade em questão. Isso abrange desde a matéria-prima utilizada até a energia consumida, o transporte envolvido, as emissões para o ar, os efluentes gerados, os resíduos sólidos produzidos e outros aspectos relevantes. Essa abordagem detalhada visa capturar

todos os elementos que influenciam o impacto ambiental ao longo do ciclo de vida, fornecendo uma base sólida para as etapas subsequentes da avaliação (IPEN, 2023).

Os dados destinados ao inventário devem sermeticulosamente coletados para cada processo elementar dentro da fronteira do sistema definida. Esses dados, independentemente de serem medidos, calculados ou estimados, têm como objetivo quantificar as entradas e saídas de cada processo. É crucial documentar explicitamente todos os procedimentos de cálculo e justificar claramente os pressupostos utilizados. É recomendável aplicar os mesmos métodos de cálculo de maneira consistente ao longo de todo o estudo. Além disso, uma verificação da validade dos dados deve ser realizada durante a coleta para assegurar que os requisitos de qualidade dos dados para a aplicação desejada sejam atendidos, fornecendo assim evidências adequadas (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

2.6.3 Avaliação do impacto (AICV)

A avaliação de impacto ambiental é um processo abrangente, abarcando aspectos tanto qualitativos quanto quantitativos, empregado para compreender e avaliar a magnitude e a importância dos impactos ambientais. Essa análise fundamenta-se nos dados obtidos durante a fase de inventário, considerando os potenciais efeitos sobre o meio ambiente e a saúde humana. Os detalhes da análise, a escolha dos impactos a serem avaliados e a metodologia empregada são determinados no objetivo e escopo do estudo. Na AICV os resultados do inventário são convertidos em uma série selecionada de impactos, incluindo, mas não se limitando ao aquecimento global, destruição da camada de ozônio, eutrofização, formação fotoquímica de ozônio, toxicidade e ocupação de solo (IPEN, 2023).

Na seleção de categorias de impacto, indicadores e modelos de caracterização em uma ACV, é essencial fazer referência às informações e fontes relacionadas. Isso também se aplica ao estabelecimento de novas categorias de impacto, indicadores ou modelos. A caracterização dos resultados do inventário envolve a conversão desses resultados para unidades comuns e sua agregação dentro da mesma categoria de impacto, utilizando fatores de caracterização. O resultado desse processo é um valor numérico do indicador. Já a normalização consiste em calcular a magnitude dos resultados dos indicadores em relação a uma referência específica. O objetivo da normalização é fornecer uma compreensão mais

clara da magnitude relativa de cada indicador de impacto do sistema de produto em análise (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Ainda podem ser executadas a ponderação e o agrupamento. A ponderação trata da aplicação de pesos aos resultados dos indicadores de categoria normalizados, de modo a se trazer características regionais ao estudo. Já a agregação corresponde a junção dos indicadores de categoria em um único indicador de resultado (ABNT NBR ISO 14044, 2009), chamado de Single-score ou Eco-ponto (Souza, Morey e Castanheira, 2015).

2.6.4 Interpretação do ciclo de vida

A fase de interpretação representa a etapa final da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), cujo objetivo é analisar os resultados obtidos nas fases de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV), de forma crítica e sistemática (ABNT, NBR ISO 14044, 2009). Nesta etapa, é possível identificar quais processos ou fluxos contribuem de maneira mais significativa para os impactos ambientais, auxiliando na priorização de ações de melhoria e na tomada de decisões estratégicas.

Além da identificação de pontos críticos, a interpretação envolve a avaliação da qualidade dos dados, das incertezas e das limitações metodológicas, garantindo que as conclusões sejam consistentes e fundamentadas (Fava *et al.*, 1991). Esta análise crítica permite também verificar a robustez dos resultados, identificar possíveis inconsistências e propor ajustes no escopo ou nos objetivos do estudo, sempre documentando as alterações e justificativas correspondentes.

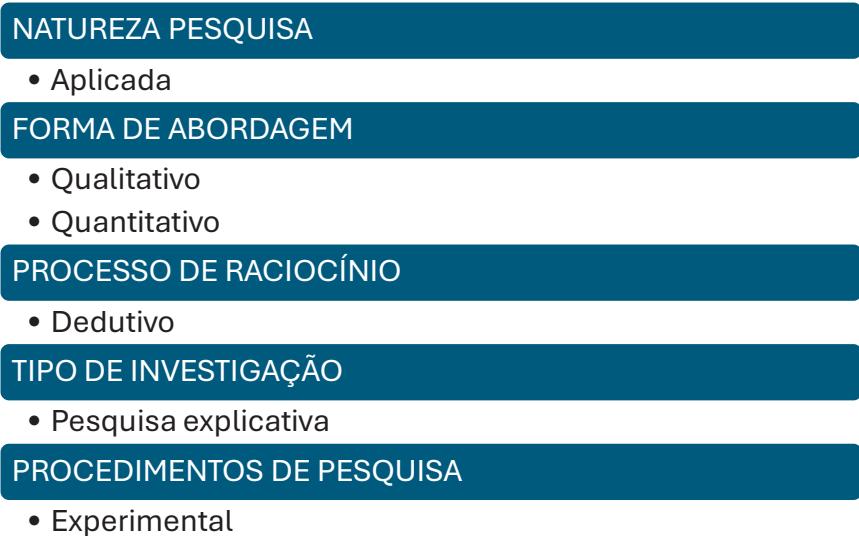
Outro aspecto relevante é a comunicação transparente dos resultados, permitindo que gestores, formuladores de políticas e demais partes interessadas compreendam de maneira clara os impactos e as recomendações do estudo (Hertwig *et al.*, 2019). Por meio da interpretação, a ACV se torna não apenas uma ferramenta de avaliação, mas também um instrumento de suporte à decisão e planejamento ambiental, fortalecendo a confiabilidade e a utilidade dos resultados obtidos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa em questão adota uma abordagem experimental, na qual diferentes cenários são definidos para avaliar seus efeitos no estudo. Desta forma, foi realizada a classificação da pesquisa, conforme Figura 2.

Figura 2. Classificação da pesquisa



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

- Natureza da pesquisa: a pesquisa aplicada busca gerar conhecimento para a aplicação prática, objetivando a solução de problemas específicos (Gombrich, 2002).
- Forma de abordagem: nesta pesquisa a forma de abordagem é quantitativa e qualitativa. No caso da qualitativa, não se preocupa com dados numéricos e sim com a compreensão e veracidade dos dados. Já a quantitativa tem suas raízes no pensamento positivo lógico (Gombrich, 2002).
- Processo de raciocínio: Em relação ao processo de raciocínio, este estudo é classificado como dedutivo. Isso ocorre porque o método dedutivo parte de princípios ou teorias gerais para a verificação de

hipóteses específicas, buscando testar e validar essas hipóteses por meio de observações e dados empíricos (Crawford, 2009).

- Tipo de investigação: Explicativa. Esse estudo busca entender as razões dos acontecimentos por meio da identificação e análise de relações de causa e efeito (Crawford, 2009).
- Procedimento de pesquisa: trata-se de uma pesquisa experimental, essa pesquisa adota um delineamento experimental, pois, para investigar os impactos dos microplásticos em lavagens domésticas foram conduzidos testes em laboratório (Crawford, 2009).

3.2 ETAPAS DE PESQUISA

O estudo foi conduzido com foco na análise da liberação de fibras sintéticas e naturais durante lavagens domésticas e seguida da quantificação do impacto ambiental potencial através da ACV. A metodologia foi dividida em seis etapas, conforme ilustrado na Figura 3. As etapas experimentais são definidas como a caracterização dos artigos têxteis, planejamento experimental e contagem de fibras. Além disso, após as etapas experimentais, são detalhados os cálculos do impacto ambiental potencial de microplásticos dos artigos têxteis através da técnica de ACV. Dessa forma, o delineamento dessas etapas metodológicas é fundamental para assegurar a robustez da investigação e a validade dos resultados obtidos na quantificação da liberação de microfibras e na avaliação de seus impactos ambientais.

Figura 3. Etapas metodológicas definidas para a execução da pesquisa.



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

3.2.1 Artigos Têxteis definidos para estudo

Para este estudo foi definido o uso de três tipos de artigos têxteis sendo eles:

- Algodão (CO)
- Poliamida (PA)

- Poliésteres (PES)

Essas fibras foram escolhidas por sua predominância no consumo do mercado brasileiro. O poliéster lidera atualmente o consumo e a produção dentre as fibras sintéticas, enquanto o algodão se mantém como a principal fibra natural consumida e produzida no país. A inclusão da poliamida justifica-se por sua ampla aplicação em artigos de moda e tecidos técnicos, especialmente no segmento esportivo. A escolha dessas fibras, além de refletir sua representatividade no mercado brasileiro, garante a confiabilidade dos resultados, pois possibilita analisar a relação entre a composição do tecido e os impactos ambientais decorrentes da liberação de microfibras (ABIT, 2024; GBLJEANS, 2023; IEMI, 2024).

3.2.2 Caracterização dos artigos têxteis

Esta etapa de caracterização dos artigos têxteis teve como objetivo identificar as características físicas que podem influenciar a liberação de microfibras durante o processo de lavagem. A caracterização permite estabelecer parâmetros comparativos entre os diferentes tecidos analisados, fornecendo subsídios para compreender como a composição e a estrutura de cada material impactam na geração de microfibras e, consequentemente, nos potenciais efeitos ambientais decorrentes (Figura 4).

Figura 4. Fluxo de etapas a serem realizadas.



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

3.2.2.1 Definição da composição

Segundo a ABNT NBR 12744:1992, os tecidos de algodão (CO), poliamida (PA) e poliéster (PES) foram discriminados para levantamento da seguinte informação:

- a) Cor, tamanho, composição dimensões e peso a seco.
- b) Gramatura, regain, carreiras e colunas, ligamento.
- c) Tipo do fio e densidade linear.
- d) Comprimento das fibras.

Estes testes/ensaios são detalhados nos tópicos 3.2.2.2 à 3.2.2.8.

3.2.2.2 Composição da peça

Os tecidos comprados apresentam uma composição única, ou seja, 100% de apenas um material. Esta composição foi um requisito estabelecido para este estudo, de modo a se investigar a liberação de microplásticos de forma individual, sem interferência de outros tecidos em mistura.

3.2.2.3 Peso seco

Para a obtenção do peso seco dos tecidos, foram cortadas cinco amostras de 10x10cm de cada tipo de tecido, essas amostras foram pesadas em temperatura ambiente.

Em seguida as mesmas foram colocadas em estufa para remoção da umidade. A temperatura da estufa foi de 60°, por um período de uma hora. Após o resfriamento foram novamente pesadas. A média dos pesos obtidos foi utilizada como peso seco.

3.2.2.4 Gramatura do Tecido

A gramatura foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 10591 (2007). Foram recortadas três amostras de 10x10cm de cada tecido e foram pesadas em balança analítica, onde a gramatura foi calculada seguindo a equação 1.

$$\frac{g}{m^2} = \bar{m} \times 100 \quad (1)$$

3.2.2.5 Regain

Para esta análise, foram também cortadas cinco amostras de 10x10cm de cada tecido, em pontos diferentes. As amostras foram pesadas e os resultados anotados. Posteriormente as amostras foram colocadas em estufa para secagem, onde ficaram por um período de uma hora, o peso final das amostras foi anotado. O resultado foi obtido através da diferença do peso do tecido seco em estufa em relação ao tecido com umidade ambiente.

$$Regain(\%) = \left(\frac{peso\ original(g) - peso\ seco(g)}{peso\ seco(g)} \right) \times 100 \quad (2)$$

3.2.2.6 Carreira e Colunas

Seguindo a ABNT NBR10588:2015, de determinação do número de fios para tecidos planos foi cortado cinco amostras de 5X5cm aproximadamente, em pontos diferentes do tecido. Os tecidos de Poliéster e Algodão foram desfiados fio a fio para contagem, já o tecido de Poliamida não foi possível devido ao ligamento dos fios. Neste caso, foi utilizado uma lupa conta fios, para realização da contagem.

A lupa conta-fios é um instrumento óptico de precisão, compacto e geralmente dobrável, que serve para inspecionar e contar detalhes minuciosos em objetos. Composta por uma lente de aumento de alta qualidade (tipicamente 5x a 15x) e uma base com uma abertura de medida definida (como 1 polegada ou 1 centímetro), ela permite visualizar estruturas finas que seriam imperceptíveis a olho nu, mantendo a distância focal ideal. Embora seu uso original fosse na indústria têxtil para verificar a densidade de fios, incluindo a contagem de carreiras e colunas em tecidos de poliamida, sua portabilidade e precisão a tornaram indispensável em diversas áreas como filatelia, joalheria, eletrônica e artes gráficas, garantindo um olhar atento sobre os pormenores (Oliveira, 2017; Silva, 2020). Um modelo da lupa conta-fios pode ser visualizado na Figura 5. A lupa conta-fios utilizada neste estudo foi de modelo SLF-130M, da marca Solver.

Figura 5. LUPA CONTA-FIOS METAL LED SOLVER SLF-130M



Fonte: MRE FERRAMENTAS (2025)

Foi contado tantos os fios de urdume (vertical) quanto trama (horizontal). Os dados foram anotados e foi calculado o nº de fios de acordo com a equação 3.

$$Nº\ de\ fios/cm = \frac{\text{total\ de\ fios\ no\ corpo-de-prova}}{\text{comprimento\ do\ corpo-de-prova(cm)}} \quad (3)$$

Após os cálculos foi realizado a média aritmética dos resultados obtidos.

3.2.2.7 Ligamento

Existem vários tipos de ligamentos que são formas estruturais dos tecidos. Cada tipo de ligamento concede ao tecido um tipo de característica. Com a lente de microscópio ótico foi possível observar e analisar os ligamentos de cada amostra.

Para isto, foi cortado uma amostra de cada artigo têxtil e os mesmos foram colocados no microscópio e avaliados com lente 4×/0.10. Após a visualização, foram tiradas fotos para registros dos ligamentos. Foi utilizado Microscópio trinocular do modelo EXP 90, da marca Physis.

Figura 6. Microscópio trinocular EXP 90



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

3.2.2.8 Densidade linear

A densidade linear, também conhecida como título dos fios, foi determinada seguindo o protocolo adaptado da norma ABNT NBR 13216 (1994) – *Materiais têxteis – Determinação do título de fios em amostras de comprimento reduzido*. Basicamente se trata do título do fio utilizado na fabricação do tecido. Para análise foi necessária a retirada de amostras dos fios do tecido. Com esta informação foi possível calcular o título do fio. Os valores dos títulos em Tex (gramas por 1000 metros de comprimento de fio) foram então calculados utilizando a Equação 4.

$$Título_{(Tex)} = \frac{1000 \times peso\ do\ fio_{(g)}}{comprimento\ do\ fio_{(m)}} \quad (4)$$

3.2.3 Planejamento experimental

Em seguida, depois da realização da caracterização dos artigos, foi iniciado a parte experimental, onde foi selecionada uma amostra de cada artigo. Cada amostra foi lavada individualmente, e então seca em temperatura ambiente. As lavagens foram realizadas em máquina de lavar roupas Petit 1,2kg com ciclo total de 15min.

Figura 7. Mini maquina lavadora de roupas praxis Petit 1,2KG



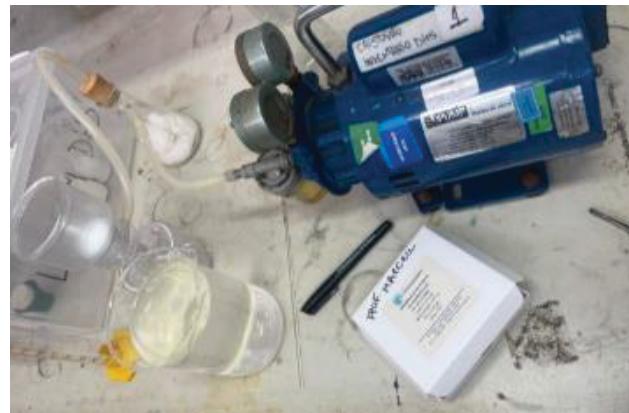
Fonte: Amazon (2025)

3.2.3.1 Materiais e equipamentos utilizados para lavagem

Para a realização das lavagens foi utilizado uma Mini máquina lavadora de roupas praxis Petit 1,2KG.

Além disto, foi montado sistema de filtragem, para isto foi utilizado bomba de vácuo conforme Figura 8. A mesma foi interligada ao sistema de filtragem, onde o filtro foi preso entre a passagem de água, conforme Figura 9.

Figura 8. Sistema de Filtragem



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Figura 9. Sistema de filtragem



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

O filtro utilizado no experimento foi microfiltro fibra de vidro GF-3 de 47mm de diâmetro, conforme Figura 10.

Figura 10. Microfiltro fibra de vidro GF-3



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Após a água foi colocada no bocal onde passou pelo filtro, a bomba estava ligada a parte inferior do sistema de filtragem, realizando o vácuo, ou seja, facilitando a passagem da água que estava no compartimento superior para o inferior.

3.2.3.2 Execução das lavagens

As lavagens das peças ocorreram em máquina de lavar, com ciclo completo de lavagem. Na Figura 11 é possível observar os tipos de ciclos possíveis da máquina.

Figura 11. Ciclo da Máquina Petit

Petit	
Lavagem	Minutos
Suave	0 a 3
Leve	3 a 6
Médio	6 a 9
Pesado	9 a 12
Super pesado	12 a 15

Fonte: Manual Petit (2025)

Foi considerado um total de 7 litros de água para cada lavagem dos artigos, sendo considerado a capacidade médias da máquina segundo especificações do manual.

Segundo o manual da lavadora Petit, “coloque a quantidade de água de acordo com a quantidade de roupa a ser lavada, até a marcação MÁX (aproximadamente 14 litros de água) para a capacidade total de roupas (1,2 kg de roupa seca) ou até a marcação MÍN (aproximadamente 9 litros) para meia carga de roupa (0,6 kg de roupa seca)” (Manual Petit, p. 6, 2025).

Foi realizado 10 lavagens de cada artigo individualmente, com água captada sempre da mesma torneira, a fim de padronização.

Entre cada lavagem foi realizada a limpeza da máquina, onde a mesma foi preenchida somente com água, em sua capacidade total e realizado ciclo completo de lavagem, e a água foi então descartada.

3.2.3.3 Filtragem do efluente

Após as lavagens os efluentes foram filtrados em filtros de vidro através do sistema de filtragem montado. Foi realizado filtragem de três amostras do efluentes de 1000ml cada, início meio e fim de todas as lavagens, ou seja no momento em que a água seria descartada da máquina, foi coletado uma amostra de 1000ml do parte de efluente inicial solto, quando a máquina atingiu visualmente a metade da capacidade preenchida da lavagem foi coletado uma amostra de 1000ml desse

efluente, e por fim quando visualmente foi perceptível que estaria no final da capacidade total utilizada foi coletado mais uma amostra de 1000ml .

A partir de cada amostra coletada, foi filtrado 250ml de cada efluente pós-lavagem.

Para análises futuras em microscópio, foi armazenado em tubo de ensaio uma quantidade de efluente de cada lavagem, sendo que como explicado anteriormente foram três filtragens, ou seja, dentro um tubo de ensaio foi misturado a água do início meio e fim que foram utilizadas nas filtragens. Considerando que essa mistura foi realizada somente dentro do mesmo artigo e mesma lavagem. Esse procedimento foi realizado para todas as lavagens e artigos individualmente. Esses efluentes foram posteriormente utilizados para análises em câmara de Neubauer através de microscópio.

3.2.4 Análise Estatística

Segundo Triola (2018), a estatística é dedicada à coleta, organização, análise e interpretação de dados para apoiar decisões fundamentadas em evidências concretas. A palavra “estatística” deriva do termo latino *status*, que significa “estado”, refletindo seus primeiros usos na compilação de informações sobre aspectos demográficos e econômicos de territórios. Desde então, a estatística evoluiu e tornou-se uma ferramenta essencial em diversas áreas do conhecimento, orientando desde políticas públicas até estratégias empresariais e pesquisas científicas.

Compreender a natureza dos dados é fundamental para a escolha dos métodos estatísticos mais apropriados. Os dados podem ser classificados como (Triola, 2018):

- Quantitativos: que expressam contagens ou medições numéricas.
- Qualitativos ou categóricos: que agrupam características não numéricas em categorias distintas.

Na era atual, em que ferramentas computacionais facilitam os cálculos, o principal desafio reside em compreender os pressupostos de cada método, reconhecer suas limitações e avaliar suas implicações práticas. Dessa forma, a estatística se consolida como um instrumento essencial para transformar dados brutos em informações úteis e relevantes, orientando a tomada de decisões em variados contextos (Triola, 2018).

3.2.4.1 Teste de Hipótese

Frequentemente nos deparamos com a necessidade de verificar afirmações sobre parâmetros populacionais, como a média. O teste de hipóteses é a ferramenta que nos permite fazer isso com base em dados amostrais. Entre os diversos testes disponíveis, o Teste t é um dos mais empregados, especialmente quando se trabalha com médias de populações e a variância populacional é desconhecida, ou quando o tamanho da amostra é pequeno (Triola, 2018).

De acordo com Bussab e Morettin (2017), o teste de hipóteses constitui um procedimento sistemático para avaliar a validade de uma afirmação sobre parâmetros populacionais. Ele é estruturado a partir da formulação de duas hipóteses: a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1). A hipótese nula representa a suposição inicial, geralmente de igualdade, e só deve ser rejeitada quando as evidências amostrais forem suficientemente fortes. A hipótese alternativa, por sua vez, traduz a suposição que se deseja testar, podendo indicar que o parâmetro populacional difere, é menor ou maior que determinado valor.

O processo de decisão baseia-se na comparação da estatística de teste com valores críticos definidos a partir do nível de significância (α), que representa a probabilidade de cometer um erro tipo I, isto é, rejeitar H_0 quando ela é verdadeira. Valores usuais de α são 5% ou 1%. Alternativamente, pode-se adotar o valor-p como critério de decisão, que expressa a probabilidade de observar dados tão extremos quanto os obtidos, assumindo H_0 verdadeira (Montgomery; Runger, 2014).

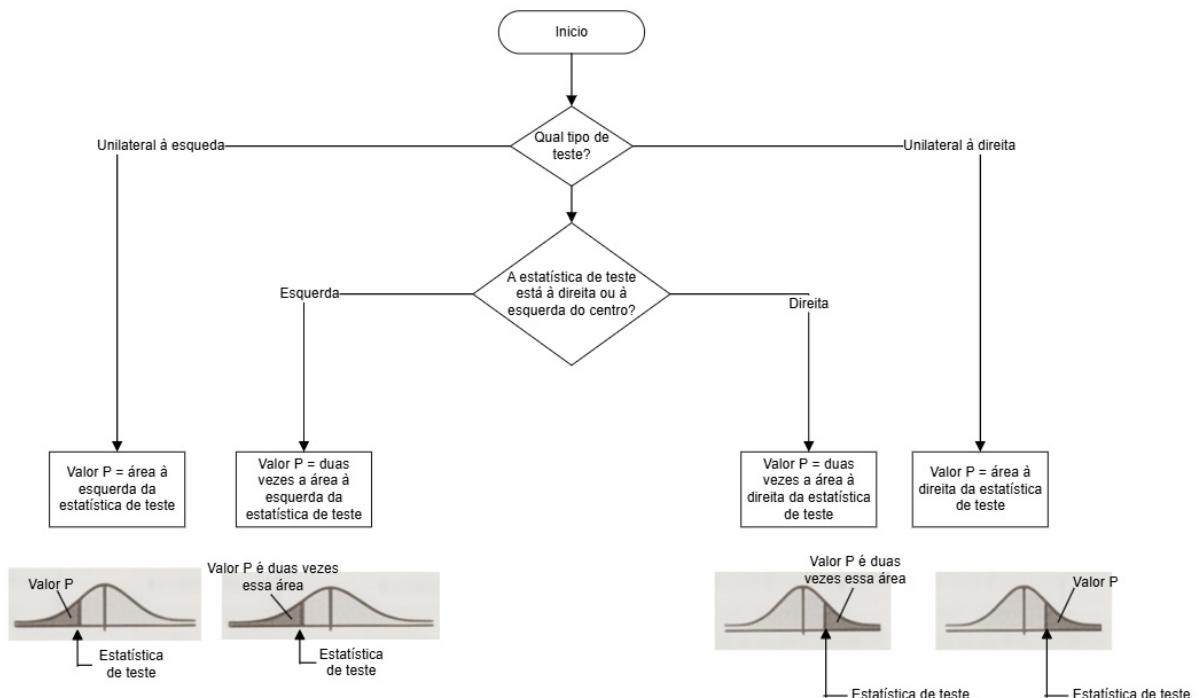
O teste t de Student foi desenvolvido por William Sealy Gosset, em 1908, sob o pseudônimo “Student”, e tornou-se uma das ferramentas estatísticas mais aplicadas para comparação de médias entre grupos. Sua utilização é especialmente indicada quando o tamanho da amostra é reduzido e a variância populacional é desconhecida, condições comuns em pesquisas experimentais. Além disso, o teste é considerado robusto, mantendo boa confiabilidade mesmo com desvios moderados da normalidade dos dados (Montgomery; Runger, 2014; Magalhães; Lima, 2011). Em estudos ambientais e de engenharia, como o presente, o teste t é amplamente adotado por permitir verificar, com base em dados amostrais, se diferenças observadas entre grupos refletem variações reais ou se podem ser atribuídas ao acaso.

Todo o procedimento de um teste de hipóteses, desde a formulação das hipóteses até a conclusão, pode ser visualizado de forma esquemática. Na Figura 12, estão resumidas as etapas essenciais, ilustrando o fluxo de trabalho e as decisões envolvidas em cada fase.

No presente estudo, o teste t foi utilizado para analisar duas situações:

- i. verificar se os valores médios de filtragem do branco poderiam ser considerados semelhantes a zero, de modo a constatar que a filtragem do branco realmente não possuía quantidades significativas de material retido;
- ii. verificar se os valores médios de filtragem da lavagem de tecidos poderiam ser considerados diferentes das médias da filtragem do branco, caracterizando que a lavagem dos tecidos resultou, de fato, no desprendimento de material retido pelos filtros

Figura 12. Procedimento para a Determinação de Valores P.



Fonte: Triola, 2018

3.2.5 Avaliação do Ciclo de Vida dos Artigos Têxteis em Estudo

A condução da ACV seguiu os princípios, diretrizes e requisitos estabelecidos nas normas ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT NBR ISO 14040, 2009; ABNT NBR ISO 14044, 2009), sendo composta de 4 fases, conforme Figura 13. Dessa forma, os detalhes das etapas de 1) Definição de Objetivo da ACV, 2) Escopo da ACV, 3) Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e 4) Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) estão apresentados nas seções seguintes.

Figura 13. Etapas da ACV



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

3.2.5.1 Definição de objetivo e escopo

O objetivo da ACV iniciou-se pela definição da aplicação pretendida do estudo, sendo comparar o impacto potencial ambiental de artigos têxteis, como algodão, poliéster e poliamida. O propósito deste estudo foi identificar, por meio de uma análise de caso, os polímeros e cenários que apresentam os melhores e piores desempenhos ambientais utilizando a técnica de Avaliação de Ciclo de Vida.

Na etapa de definição de escopo, a escolha adequada da unidade funcional é crucial, pois está diretamente ligada à função do produto avaliado e influencia significativamente os resultados da ACV. Uma definição clara e mensurável da unidade funcional é essencial para garantir comparações precisas entre diferentes sistemas de produtos, garantindo que todos sejam avaliados com base nas mesmas funções, unidades funcionais e fluxos de referência (Fiatkoski, 2022).

Para o presente estudo, o produto, no contexto deste estudo, refere-se aos tecidos confeccionados a partir de diferentes fibras (algodão, poliéster e poliamida), cujo ciclo de vida inclui a etapa de lavagens domésticas que liberam microfibras. A função descreve o desempenho ou o propósito para o qual o sistema de produto (neste caso, o artigo têxtil) é avaliado, sendo a descrição do serviço que o artigo têxtil provê, como vestuário ou limpeza. A unidade funcional para este estudo foi definida como vestir uma pessoa por um período de 6 meses, onde o tecido passaria por ciclos iguais de frequência de lavagens, independente do tecido (algodão, poliéster ou poliamida). Por sua vez, o fluxo de referência é a quantidade de produtos (bens ou serviços) necessária para cumprir a unidade funcional definida para o estudo.

Vale aqui ressaltar que as metragens de tecidos lavadas na parte experimental se traduziram em 600 gramas (g) de cada material (algodão, poliamida e poliéster), representando metade da capacidade total da máquina de lavar (1,2 kg) utilizada, a fim de padronizar a quantidade de massa de entrada e melhor análise de desprendimento de microfibras por igual. Entretanto, para ACV, foi padronizado a área quadrada de uma camiseta de tamanho M unissex, manga longa, com base nas medidas padrões da Select Uniformes (Tabela 1). Consequentemente as massas de cada tecido tornam-se diferentes de acordo com suas respectivas gramaturas.

Tabela 1. Guia de Tamanhos Camisetas

Tamanho	Comprimento (cm)	Largura (cm)	Manga longa (cm)
12	55	43	53
14	61	48	55
P	65	51	61
M	70	53	62
G	72	56	63,5
GG	75	60	65

Fonte: South to South (2025)

A área definida foi obtida através da estimativa da área de corpo e área de manga da camiseta.

Para a área do corpo da camiseta, foi realizado o seguinte cálculo, adicionando a multiplicação por 2, para representar a frente e o verso da camiseta:

$$\text{Área do corpo da camiseta} = \text{Comprimento} * \text{Largura} * 2$$

$$\text{Área do corpo da camiseta} = 0,70m * 0,53m * 2$$

$$\text{Área do corpo da camiseta} = 0,742m^2$$

Para a área da manga da camiseta, adicionando a multiplicação por 4, para representar as duas mangas e ainda a frente e o verso da camiseta, foi realizado o seguinte cálculo:

$$\text{Área da manga da camiseta} = 0,62m * 0,1m * 4$$

$$\text{Área da manga da camiseta} = 0,248m^2$$

Assim, a área total da camiseta estimada foi de 0,99 m².

Como complemento, o Quadro 5 apresenta de forma resumida as definições para objetivo da ACV, função, unidade funcional e fluxo de referência do estudo, bem como as demais definições de escopo da ACV.

Quadro 5. Resumo das definições de objetivo e escopo da ACV

Componente		Característica
OBJETIVO	Aplicação pretendida	Comparar o impacto potencial ambiental de artigos têxteis de algodão, poliéster e poliamida.
	Público-alvo	Comunidade acadêmica e setores da indústria têxtil.
	Razão	Identificar, por meio de uma análise de caso, os polímeros e cenários que apresentam os melhores e piores desempenhos ambientais utilizando a técnica de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).
ESCOPO	Função do produto	Fornecer serviço de vestuário ou limpeza.
	Unidade funcional	Vestir uma pessoa por um período de 6 meses, onde o tecido passaria por frequência igual de lavagens, independente do tecido.
	Fluxo de referência	1 camiseta M unissex manga longa, com área de 0,99 m ² de tecido, considerando que a duração da peça ou metragem quadrada de roupa é igual, independentemente do material (algodão, poliamida ou poliéster).
	Sistema de produto	Portão a portão, considerando somente o processo de lavagem das peças de tecidos
	Fronteira do sistema	Demais processos de fases do ciclo de vida diferentes da fase de lavagem das peças de tecidos.
	Metodologia de impacto	ReCiPe 2016 Midpoint (H) e MariLCA
	Software	OpenLCA e Excel

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

3.2.6 Inventário do Ciclo de vida

Na segunda fase da metodologia da ACV, denominada análise de inventário, ocorreu a coleta e quantificação de todas as variáveis relevantes, como matéria-prima, energia, transporte, emissões para o ar, efluentes e resíduos sólidos, que estejam associadas ao ciclo de vida do produto, processo ou atividade em avaliação (IPEN, 2023). Para elaboração do ICV, foram coletados dados dos tecidos utilizados, bem como do balanço de massa e energia do processo de lavagem das peças de tecidos.

Os dados inventariados seguem as Tabelas 2, 3, 4, não sendo considerado o processo de secagem no ICV. A quantidade mássica de tecido lavado, e que o ICV representa em cada uma das três Tabelas, foi de 600 g para cada tecido. Vale ressaltar que a massa informada de cada tecido nas três Tabelas se refere a perda mássica média das 10 lavagens pelo desprendimento das fibras de tecido, e não a massa total de tecido lavada. Isto ocorreu porque a massa de tecido que entra para a lavagem e depois sai do processo como tecido a ser seco e usado, acaba tendo seu impacto ambiental anulado em relação ao consumo de material (tecido), dado que a massa de entrada e saída são iguais.

Tabela 2. Inventário de dados para a fase uso do ciclo de vida do tecido poliéster.

INPUTS			
MATERIAL/PROCESSO	Unidade	Quantidade	Dado do Ecoinvent 3.9.1
ELECTRICITY, LOW VOLTAGE	kWh	0,02	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-Southern grid
TAP WATER	kg	7,0	market for tap water tap water Cutoff, U - BR
FIBRE, POLYESTER	g	0,000337	polyester fibre production, finished fibre, polyester Cutoff, U - RoW
OUTPUTS			
LAVAGEM TECIDO POLIÉSTER	g	0,000337	
WASTEWATER, AVERAGE	L	7,0	treatment of wastewater, average, wastewater treatment wastewater, average Cutoff, U - RoW

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Tabela 3. Inventário de dados para a fase uso do ciclo de vida do tecido poliamida.

INPUTS			
MATERIAL/PROCESSO	Unidade	Quantidade	Dado do Ecoinvent 3.9.1
ELECTRICITY, LOW VOLTAGE	kWh	0,02	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-Southern grid
TAP WATER	kg	7,0	market for tap water tap water Cutoff, U - BR
NYLON	g	0,000483	Nylon
OUTPUTS			
LAVAGEM TECIDO POLIAMIDA	g	0,000483	
WASTEWATER, AVERAGE	L	7,0	treatment of wastewater, average, wastewater treatment wastewater, average Cutoff, U - RoW

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Tabela 4. Inventário de dados para a fase uso do ciclo de vida do tecido algodão.

INPUTS			
MATERIAL/PROCESSO	Unidade	Quantidade	Dado do Ecoinvent 3.9.1
ELECTRICITY, LOW VOLTAGE	kWh	0,02	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR-Southern grid
TAP WATER	kg	7,0	market for tap water tap water Cutoff, U - BR
FIBRE, COTTON	g	0,001653	fibre production, cotton, ginning fibre, cotton Cutoff, U - RoW
OUTPUTS			
LAVAGEM TECIDO ALGODÃO	g	0,001653	
WASTEWATER, AVERAGE	L	7,0	treatment of wastewater, average, wastewater treatment wastewater, average Cutoff, U - RoW

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

3.2.7 Avaliação do impacto do ciclo de vida

Para avaliar a importância ambiental dos resultados do ICV e realizar uma análise comparativa, optou-se pela utilização do método ReCiPe 2016 Midpoint (H). O software utilizado para a quantificação dos impactos ambientais potenciais dos três tecidos foi o OpenLCA.

Já para a quantificação dos impactos ambientais potenciais dos microplásticos liberados no processo de lavagem dos tecidos, foi utilizado os fatores de caracterização do projeto MARILca, de acordo com Corella-Puertas *et al.* (2023). A fórmula de cálculo utilizada para o cálculo de impacto dos microplásticos segue equação 6 (Heijungs e Suh, 2011).

$$IC_x = \sum_{n=1}^m Q_n \cdot FC_n \quad (6)$$

Onde:

- IC_x é a categoria de impacto x;
- Q_n é a quantidade do composto n;
- FC_n é o fator de caracterização do composto n;
- m é o número total de compostos na categoria de impacto x.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da caracterização dos artigos têxteis, as filtragens de fibras de tecidos no processo de lavagem e a avaliação do ciclo de vida do impacto ambiental potencial do processo de lavagem, considerando os impactos das fibras plásticas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ARTIGOS

Nesta seção são apresentados os resultados das análises realizadas na etapa de caracterização dos artigos têxteis, sendo organizados da seguinte forma:

- Peso seco da amostra
- Gramatura do tecido
- Regain
- Carreiras e Colunas
- Ligamento
- Densidade Linear

4.1.1 Peso seco da amostra

A partir da execução das análises dos tecidos, conforme 3.2.1.3, foram obtidos os resultados de peso seco de cada tecido, conforme Tabela 5.

Tabela 5. Peso seco dos artigos

Amostras	Peso seco (g)		
	Poliamida	Poliéster	Algodão
1	1,9462	1,2686	1,2479
2	1,9112	1,2583	1,2332
3	1,8302	1,2958	1,2279
4	1,8591	1,3159	1,2502
5	1,8189	1,3152	1,2376
Média	1,87312	1,2908	1,2394

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Através dos resultados, é possível perceber que a Poliamida apresenta o maior peso seco, já o algodão e o poliéster possuem pesos similares. Esta informação

nos mostra que para uma mesma área de tecido, a poliamida seria mais pesada, ou seja, teria mais massa incorporada. Esta informação nos esclarece que, quando da ACV, o tecido de poliamida acabará tendo mais matéria-prima utilizada para a produção dos artigos têxteis, quando comparado com os outros dois tecidos.

Além disto, vale ressaltar que essa análise de peso seco foi importante para que fosse possível analisar o Regain, ou seja a porcentagem de absorção de água de cada artigo.

4.1.2 Gramatura do Tecido

A Tabela 6 apresenta os dados coletados de gramatura para os diferentes tipos de artigos analisados. Foram realizadas três análises e por fim a média das mesmas.

Tabela 6. Gramatura dos Artigos

Artigos	Amostra	Peso (g)	Gramatura (g/m ²)	Média
Tecido de Algodão	1	1,144	114,4	114,14
	2	1,146	114,6	
	3	1,1342	113,42	
Tecido de Poliéster	1	1,3188	131,88	131,57
	2	1,3058	130,58	
	3	1,3225	132,25	
Tecido de Poliamida	1	1,8827	188,27	187,61
	2	1,8791	187,91	
	3	1,8664	186,64	

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

É possível verificar que não houve grande variação de dados coletados para diferentes amostras de um mesmo artigo, ou seja, todos os tecidos apresentaram uniformidade de gramatura. A poliamida foi a que apresentou maior gramatura se comparada com os demais artigos, como já esperado, pela análise do peso seco. Este tecido tenderá a ter a maior massa incorporada para uma mesma área de tecido, quando da análise pela ACV.

4.1.3 Regain

O regain dos artigos têxteis foi obtido através da execução das análises, conforme 3.2.1.5, sendo que os resultados seguem Tabela 7.

Tabela 7. Regain dos tecido analisados.

	Análise	Peso original	Peso seco	Regain
Amostra PA	1	1,991	1,9462	2,30%
	2	1,9527	1,9112	2,17%
	3	1,8693	1,8302	2,14%
	4	1,8945	1,8591	1,90%
	5	1,8552	1,8189	2,00%
		Média		2,10%
Amostra PES	1	1,2712	1,2686	0,20%
	2	1,261	1,2583	0,21%
	3	1,3039	1,2958	0,63%
	4	1,3202	1,3159	0,33%
	5	1,3165	1,3152	0,10%
		Média		0,29%
Amostra (CO)	1	1,3188	1,2479	5,68%
	2	1,2946	1,2332	4,98%
	3	1,2778	1,2279	4,06%
	4	1,3069	1,2502	4,54%
	5	1,304	1,2376	5,37%
		Média		4,92%

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Com base nos resultados coletados foi possível verificar que o tecido de poliéster apresenta valor inferior aos demais tecidos de absorção de umidade, já o algodão é o artigo que apresentou maior quantidade de absorção de umidade. Essa informação é importante para que se possa entender que durante as lavagens dos artigos os que irão apresentar uma maior absorção de água será algodão, poliamida e poliéster respectivamente.

A Tabela 8 traz os intervalos de valores de Regain para os três tecidos em estudo, conforme a literatura.

Tabela 8. Regain das Fibras.

Sigla	Fibra	Regain (%) umidade)
CO	Algodão	8,5 – 10,5
PAC	Acrílica	1,0 – 1,5
PES	Poliéster	0,4
PA	Poliamida	2,5 – 5,0

Fonte: Maluf e Kolbe (2003) apud Cesa 2017

Foi possível verificar que os dados obtidos da fibra de algodão ficaram abaixo dos definidos pela literatura. Essa diferença pode se dar devido a vários fatores. Sendo eles fatores ambientais climáticos, visto que a experiência foi realizada em laboratório no ano de 2025, os mesmos podem não corresponder exatamente as condições padrões pelas quais foram obtidos os valores da literatura. No caso de fibras sintéticas em especial, pode haver diferenças devido a estrutura polimérica, ou seja, as fibras utilizadas neste estudo podem não ser idênticas às fibras utilizadas para determinação de dados da literatura.

4.1.4 Carreiras e Colunas

A partir do desfiamento dos tecidos de poliéster e algodão, foi possível obter os dados de carreiras e colunas por centímetro. Foram cortadas 5 amostras quadradas com laterais de 5cm.

Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os dados coletados de ambos os tecidos.

Tabela 9. Número de fios por centímetro de Algodão (CO).

Amostra CO	Urdume	Trama	Nº Urdumes/cm	Nº Trama/cm
1	157	146	31,4	29,2
2	157	119	31,4	23,8
3	152	135	30,4	27
4	161	136	32,2	27,2
5	159	135	31,8	27
Média			31,44	26,84

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Tabela 10. Número de fios por centímetro de Poliéster (PES).

Amostra PES	Urdume	Trama	Nº Urdumes/cm	Nº Trama/cm
1	105	71	21	14,2
2	105	70	21	14
3	104	74	20,8	14,8
4	101	74	20,2	14,8
5	106	72	21,2	14,4
Média			20,84	14,44

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

No caso da Poliamida foi utilizado a lupa conta fios para contagem da quantidade de fios de urdume e trama e cálculo da quantidade de fios por centímetro, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11. Número de fios por centímetro de Poliéster (PA).

Amostra PA	Urdume	Trama	Nº Urdumes/cm	Nº Trama/cm
1	60	110	30	55
2	62	105	31	52,5
3	66	105	33	52,5
4	62	106	31	53
5	60	105	30	52,5
Média			31	53,1

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

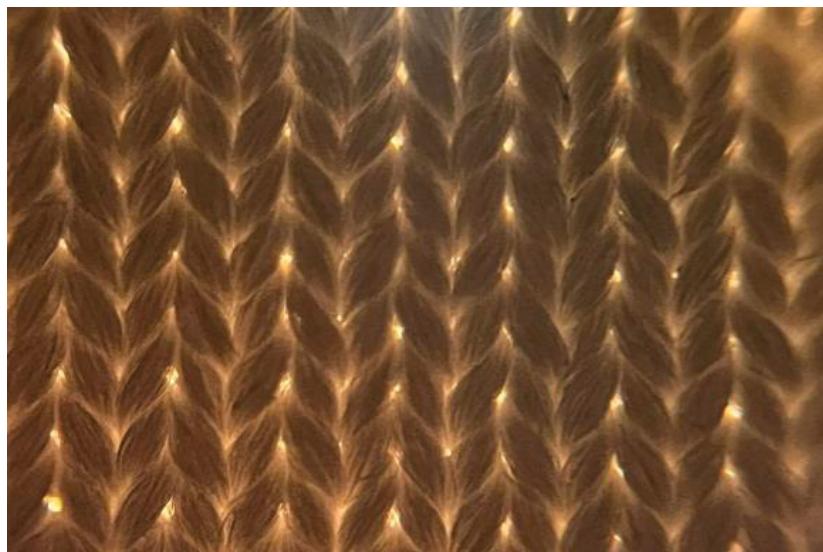
Foi possível observar que na estrutura dos artigos o tecido de Poliamida foi o que apresentou maior quantidade de Tramas por centímetro e na quantidade de urdumes por centímetro o algodão apresentou valor superior, porém, se comparado com a poliamida, essa diferença é pequena. Portanto esses valores corroboram para o que foi apresentado na seção 4.1.1 Peso seco da amostra, onde a poliamida é o tecido com maior massa incorporada.

Esses dados coletados da estrutura do tecido são importantes para comparações de estudos posteriores. A fim de comparações de resultados obtidos conforme diferenças estruturais de artigos.

4.1.5 Ligamento

O tecido de poliamida investigado neste estudo demonstrou possuir um ligamento de Meia Malha, frequentemente referido como Jersey. Este tipo de estrutura é fundamental na malharia, distinguindo-se por laçadas que se apresentam predominantemente em uma das faces do tecido. Tal formação confere à malha um lado direito e um avesso distintos, como detalhado por Aquino (2008), que descreve o lado direito com laçadas em formato de "pernas" (ou "V's") e o avesso com "pés e cabeças" (ou "barras" horizontais). Adicionalmente, a natureza da construção da Meia Malha confere ao material uma notável elasticidade bidirecional e uma tendência a enrolar nas bordas, características intrínsecas a esse ligamento básico. É possível observar na Figura 14 o ligamento deste tecido conforme analisado em microscópio.

Figura 14. Ligamento do tecido de Poliamida.

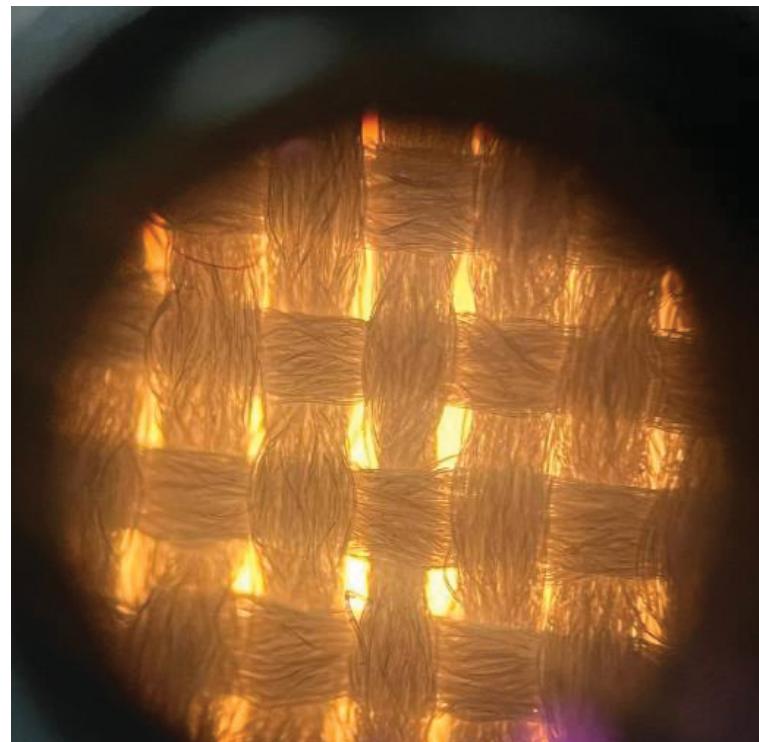


Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Os tecidos de algodão e de poliéster analisados neste estudo caracterizam-se por um ligamento plano, especificamente o de Tela, também conhecido como Tafetá. Este é considerado o entrelaçamento mais elementar na tecelagem, formado pelo cruzamento ortogonal de dois conjuntos de fios: os fios de urdume, que seguem no sentido longitudinal do tecido, e os fios de trama, que se estendem no sentido transversal (Pereira, 2008). Nesse ligamento, cada fio de urdume passa alternadamente por cima e por baixo de um fio de trama, e vice-versa, resultando em

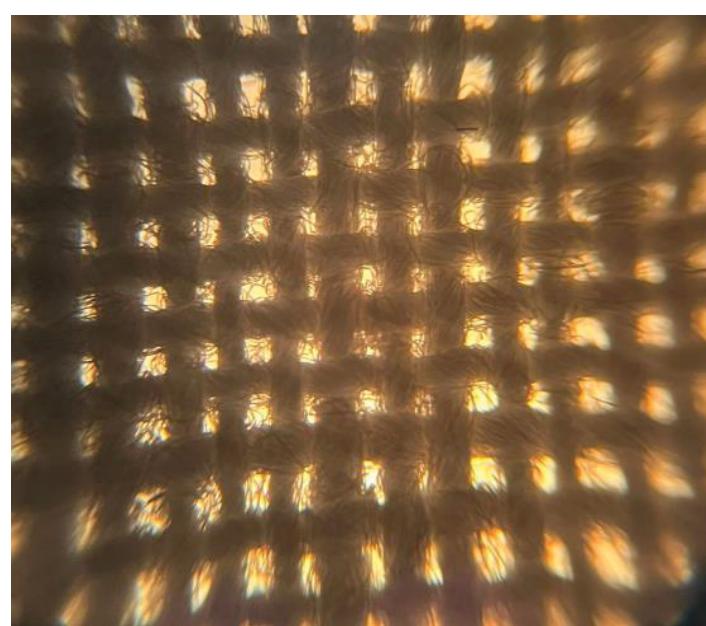
uma estrutura de entrelaçamento simples e uniforme. As Figuras 15 e 16 representam as análises realizadas em microscópio de ambos os artigos.

Figura 15. Estrutura tecido de Poliéster.



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Figura 16. Estrutura tecido de Algodão.



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

4.1.6 Densidade Linear

Os resultados de densidade linear de trama e urdume são apresentados nas Tabelas 12 e 13 para o Poliéster, enquanto as Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados para o algodão.

Tabela 12. Densidade Linear Trama Poliéster.

Amostra Trama PES	comprimento (cm)	comprimento (m)	Peso	Título (TEX)
1	100	1	0,0363	36,3
2	100	1	0,0368	36,8
3	100	1	0,0364	36,4

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Tabela 13. Densidade Linear Urdume Poliéster.

Amostra Urdume PES	comprimento (cm)	comprimento (m)	Peso	Título (TEX)
1	100	1	0,0365	36,5
2	100	1	0,0373	37,3
3	100	1	0,0366	36,6

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Tabela 14. Densidade Linear Trama Algodão.

Amostra Trama CO	comprimento (cm)	comprimento (m)	Peso	Título (TEX)
1	100	1	0,02	20
2	100	1	0,0196	19,6
3	100	1	0,0212	21,2

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Tabela 15. Densidade Linear Algodão Urdume.

Amostra Urdume CO	comprimento (cm)	comprimento (m)	Peso	Título (TEX)
1	100	1	0,0201	20,1
2	100	1	0,0204	20,4
3	100	1	0,0208	20,8

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Não foi possível realizar esta análise com o tecido de Poliamida devido a construção e ligamento, onde não foi possível que os fios se soltassem. Porém esta informação não impacta as análise e resultados posteriores, servindo apenas de parâmetro para futuras análises e comparações de dados de estudos futuros.

Os títulos dos fios de Poliéster foram maiores do que os do algodão, estes resultados coletados comprovam as gramaturas coletadas, ou seja, quanto maior o título do fio, maior a gramatura do tecido. Pode-se entender que no caso da poliamida estes valores seriam expressivamente maiores devido ao valor de gramatura do tecido. Conforme já apresentado na seção 4.1.2 Gramatura, estes valores são relevantes para comprovação das análises posteriores de ACV.

4.2 FILTRAGEM DO EFLUENTE

A partir da execução do processo de filtragem dos efluentes de lavagem dos tecidos, e também do branco, correspondente a uma lavagem sem tecido, foi possível a obtenção dos resultados de massa de material retido pós-filtragem. Estas massas foram obtidas pela subtração da massa do filtro pós e pré-filtragem. Os dados apresentados nesta seção do trabalho, na Tabela 16, referem-se aos dados médios de cada lavagem, para o branco e para os três tecidos. Os dados completos coletados dos experimentos, correspondente a três amostras por lavagem, contendo o peso seco pré-filtragem do filtro, peso seco pós-filtragem do filtro, diferença, e médias, são apresentados no Apêndice 1. Vale ressaltar que alguns dos dados de diferenças obtidos resultaram em valores negativos. Isto pode ser explicado pela seguinte razão: As massas pós-filtragem e pré-filtragem muitas vezes foram massas bastante próximas, principalmente para o branco, pegando muitas vezes na penúltima ou última casa de precisão da balança analítica utilizada.

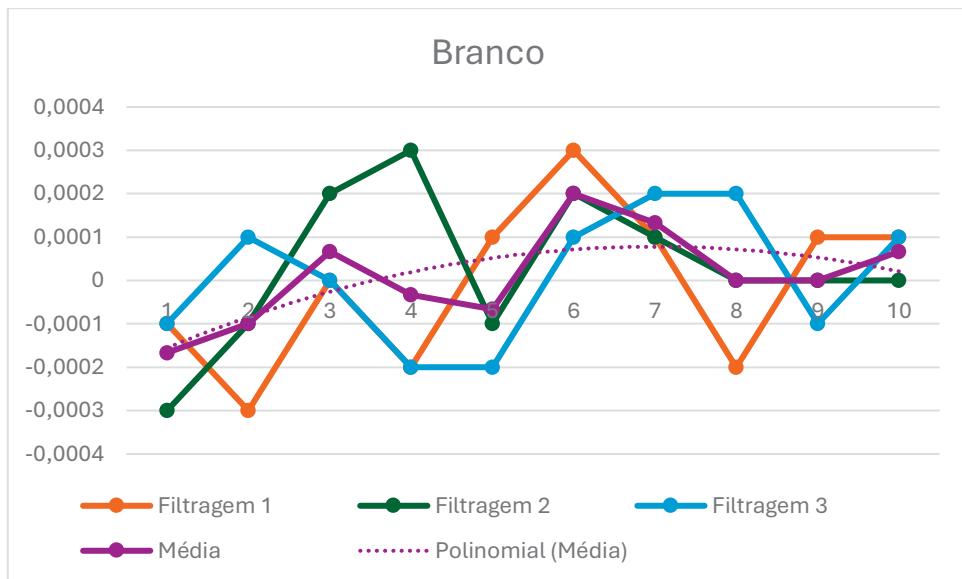
Tabela 16. Dados médios das Lavagens dos artigos

LAVAGEM	MÉDIA			
	Branco	Poliamida	Poliéster	Algodão
1	-0,00017	0,001067	0,001067	0,003067
2	-0,00010	0,000500	0,000200	0,001300
3	0,0000667	0,000233	0,000300	0,001333
4	-0,000033	0,000333	0,000267	0,001867
5	-0,000067	0,000667	0,000233	0,002233
6	0,0002	0,000300	0,000167	0,001933
7	0,000133	0,000333	0,000367	0,001600
8	4,63E-18	0,000467	0,000200	0,000733
9	-4,6E-18	0,000533	0,000233	0,000833
10	0,0000667	0,000400	0,000233	0,000667

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Através dos dados da Tabela 16 e do Apêndice 1, foi plotado um gráfico para cada artigo, a fim de uma melhor análise visual, bem como foi traçada uma linha de tendência polinomial.

Gráfico 1. Análise de água das lavagens do Branco

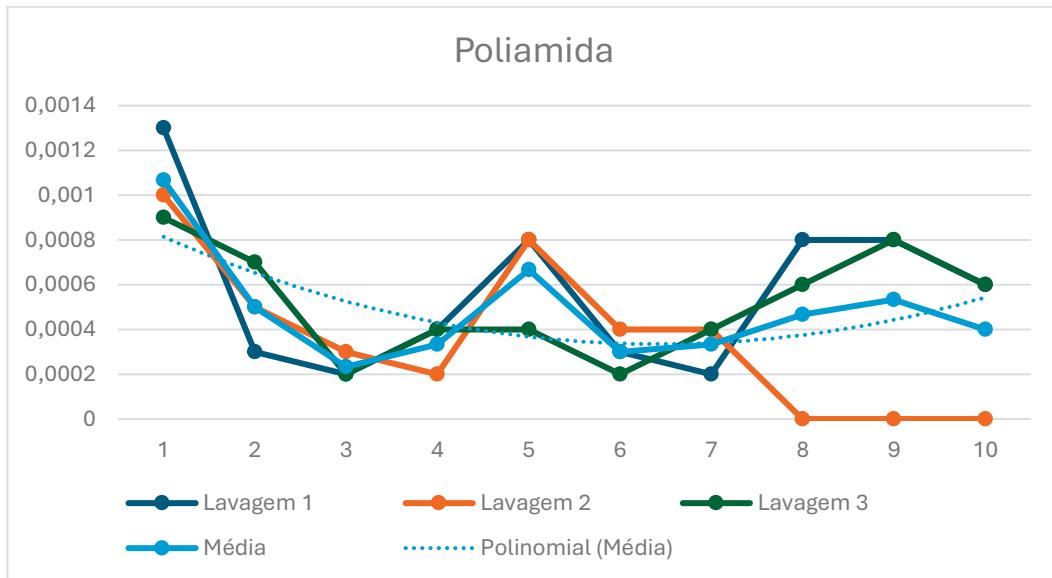


Fonte: (Autoria Própria, 2025)

O Gráfico 1 apresenta os resultados das três amostras e da média para o branco. Para a linha de tendência, foram utilizados os resultados das médias das 10 lavagens, e um polinômio de ordem 2. O desvio padrão da média foi de 0,00011005. É possível perceber para este gráfico 1 que os valores de filtragem ficam dispersos

entre a linha do zero, demonstrando um comportamento de convergência para o zero, conforme mostra a própria linha de tendência.

Gráfico 2. Análise de água das lavagens da Poliamida



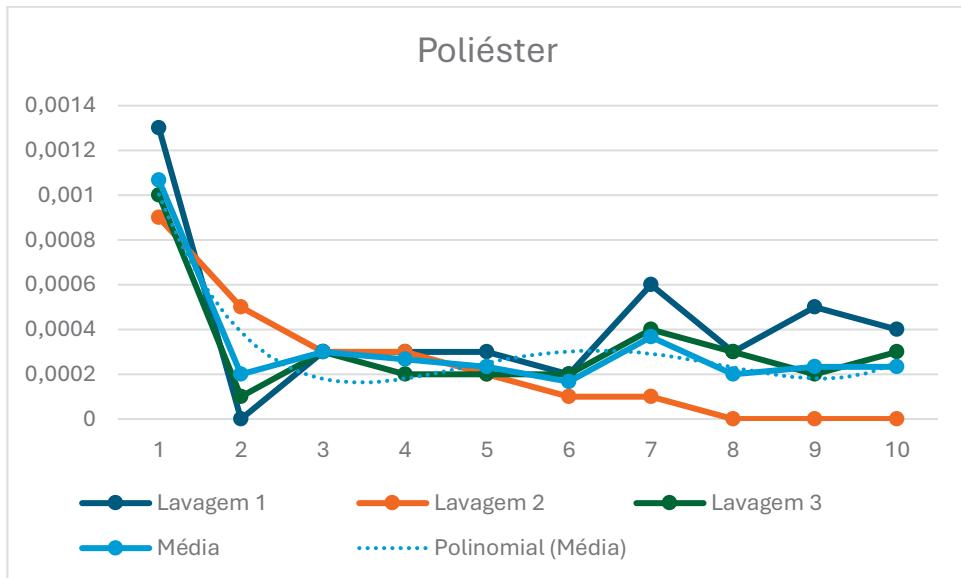
Fonte: (Autoria Própria, 2025)

O Gráfico 2 apresenta os resultados das três amostras e da média para a Poliamida. Para a linha de tendência, foram utilizados os resultados das médias das 10 lavagens, e um polinômio de ordem 2. O desvio padrão da média foi de 0,000241523. É possível perceber que os valores de filtragem partem de um valor inicial maior, através da lavagem 1, porém eles começam a oscilar entre 0,0002 e 0,0008 g até a décima lavagem. Vale destacar somente que, para a filtragem 2, os valores representados no Gráfico 2 são de zero, porém a verdade é que estes três últimos ciclos de lavagem tiveram apenas duas amostras, devido a limitação de filtros disponíveis para a finalização dos ensaios.

O Gráfico 3 apresenta os resultados das três amostras e da média para o Poliéster. Para a linha de tendência, foram utilizados os resultados das médias das 10 lavagens, e um polinômio de ordem 4. O desvio padrão da média foi de 0,000264085. É possível perceber que os valores de filtragem do Poliéster tiveram comportamento similar ao da Poliamida, partindo de um valor inicial maior, através da lavagem 1, porém oscilando posteriormente entre 0,0001 e 0,0006 g até a décima lavagem. Vale destacar somente que, para a filtragem 2, os valores representados nos Gráfico 2 à 4 para as lavagens 8 à 10 são de zero, porém a verdade é que estes três últimos ciclos

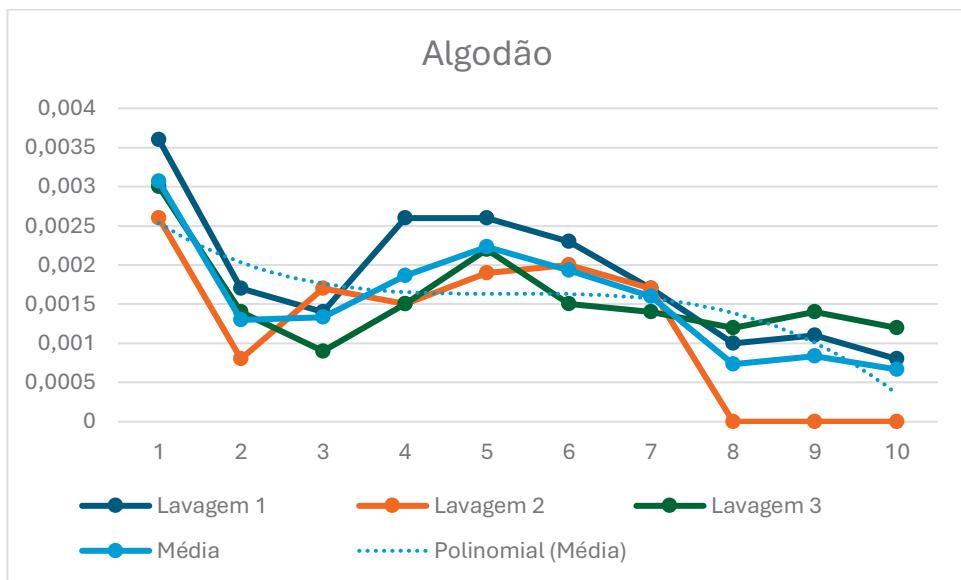
de lavagem tiveram apenas 2 amostras, devido a limitação de filtros disponíveis para a finalização dos ensaios.

Gráfico 3. Análise de água das lavagens do Poliéster



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Gráfico 4. Análise de água das lavagens do Algodão



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

O Gráfico 4 apresenta os resultados das três amostras e da média para o Algodão. Para a linha de tendência, foram utilizados os resultados das médias das dez lavagens, e um polinômio de ordem 3. O desvio padrão da média foi de

0,000643716. Assim como a Poliamida e o Poliéster, os valores de filtragem do Algodão tiveram comportamento similar, partindo de um valor inicial maior, através da lavagem 1, porém oscilando posteriormente entre 0,001 e 0,0026 g até a décima lavagem.

4.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA COM TESTE T

Foi realizada a análise estatística através do Teste T, de modo a se testar a hipótese de igualdade em duas etapas.

Para estas análises do teste de hipótese foi considerado um intervalo de confiança de 95%.

Para a primeira etapa, foram consideradas duas hipóteses para validação dos dados, sendo elas:

- Hipótese H0: caso a amostra média do branco for igual a zero;
- Hipótese alternativa: caso a hipótese H0 seja diferente;

Para validação das hipóteses foi considerado o p-valor, caso o mesmo seja inferior a 0,05 a hipótese alternativa é validada, caso seja superior que 0,05 a hipótese H0 será validada. Na Tabela 17 é apresentado os dados coletados.

Tabela 17. Teste de hipótese.

FILTRAGEM	T VALOR	DF	P-VALOR
BRANCO	0,28735	9,0000	0,7804
POLIAMIDA	-51,041	11,8730	0,0002689
POLIÉSTER	-3,6107	12,0340	0,003559
ALGODÃO	-79,575	9,5257	1,652E-05

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Dado p- valor da amostra média do branco sendo superior a 0,05 (Tabela 17), foi possível validar a hipótese H0, de igualdade entre amostra média do branco e média igual a zero. Ou seja, pode-se afirmar que o branco se assemelha a zero.

Para a segunda etapa, foram consideradas duas hipóteses para validação dos dados, sendo elas:

- Hipótese H0: caso a amostra média do tecido (Poliamida, Poliéster ou Algodão) for igual a amostra média do branco, não havendo desprendimento;

- Hipótese alternativa: caso a hipótese H_0 seja diferente, ou seja, há desprendimento;

Desta forma, foi verificado que o resultado do p-valor foi inferior a 0,05 para os três tecidos (Tabela 17), validando a hipótese alternativa, sendo ela de que a amostra média do branco e as amostras médias da poliamida, poliéster e algodão são diferentes. Portanto, podemos considerar que houve desprendimento dos tecidos analisados.

4.4 RESULTADOS DOS INDICADORES DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) foi aplicada com o objetivo de mensurar e comparar os impactos ambientais potenciais associados ao desprendimento de microfibras em lavagens domésticas de tecidos de algodão, poliamida e poliéster. A metodologia ReCiPe 2016, nas abordagens Midpoint e Endpoint, foi empregada para interpretar os impactos em diferentes níveis de agregação, oferecendo uma visão detalhada dos impactos ambientais potenciais.

4.4.1 Resultados Usando o Método de Avaliação de Impacto ReCiPe2016 Midpoint (H)

O método ReCiPe 2016 na perspectiva Midpoint (H) avalia os impactos ambientais em um nível intermediário de agregação, fornecendo resultados desagregados em categorias específicas de impacto ambiental. Cada categoria representa um mecanismo ambiental distinto, permitindo identificar quais processos contribuem de forma mais significativa para cada tipo de dano como aquecimento global, ecotoxicidade, uso de recursos ou saúde humana. A quantificação dos resultados de impacto ambiental potencial através de indicadores Midpoint é um requisito obrigatório estabelecido pela ISO 14040.

Os resultados por meio deste método foram gerados para os 3 diferentes tipos de artigos têxteis estudados (Poliamida, Poliéster e Algodão), na fase de lavagem dos tecidos, sem considerar o processo de secagem. Estes resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18. Resultados da Análise de Impacto Ambiental Usando o Método de Avaliação de Impacto ReCiPe 2016 Midpoint (H).

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE DE REFERÊNCIA	RESULTADO ALGODÃO	RESULTADO POLIAMIDA	RESULTADO POLIÉSTER
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,000435118	0,000713724	0,000500702
Formação de material particulado fino	kg PM2.5 eq	4,65558E-06	7,63244E-06	5,35562E-06
Radiação ionizante	kBq Co-60 eq	0,000106437	0,000174529	0,000122486
Eutrofização marinha	kg N eq	7,33757E-06	1,20269E-05	8,43973E-06
Ecotoxicidade em água doce	kg 1,4-DCB	0,000295113	0,000483766	0,00033949
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	1,09839E-05	1,80001E-05	1,26298E-05
Eutrofização em água doce	kg P eq	2,94643E-06	4,83084E-06	3,39008E-06
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	2,70004E-05	4,42716E-05	3,10684E-05
Formação de ozônio, ecossistemas terrestres	kg NOx eq	5,50298E-06	9,02032E-06	6,32918E-06
Toxicidade humana cancerígena	kg 1,4-DCB	0,000851733	0,001396718	0,000980152
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DCB	0,000380759	0,000624311	0,000438119
Aquecimento global	kg CO2 eq	0,002261136	0,003707887	0,002601386
Toxicidade humana não cancerígena	kg 1,4-DCB	0,00808571	0,013256647	0,009303042
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DCB	0,020867072	0,034214538	0,024011047
Depleção da camada de	kg CFC11 eq	4,39462E-09	7,19606E-09	5,05048E-09

<i>ozônio estratosférica</i>				
<i>Formação de ozônio, saúde humana</i>	kg NOx eq	5,31723E-06	8,71578E-06	6,11544E-06
<i>Uso da terra</i>	m2a crop eq	0,000133574	0,000217016	0,000152296
<i>Consumo de água</i>	m3	0,001544969	0,002533124	0,001777621

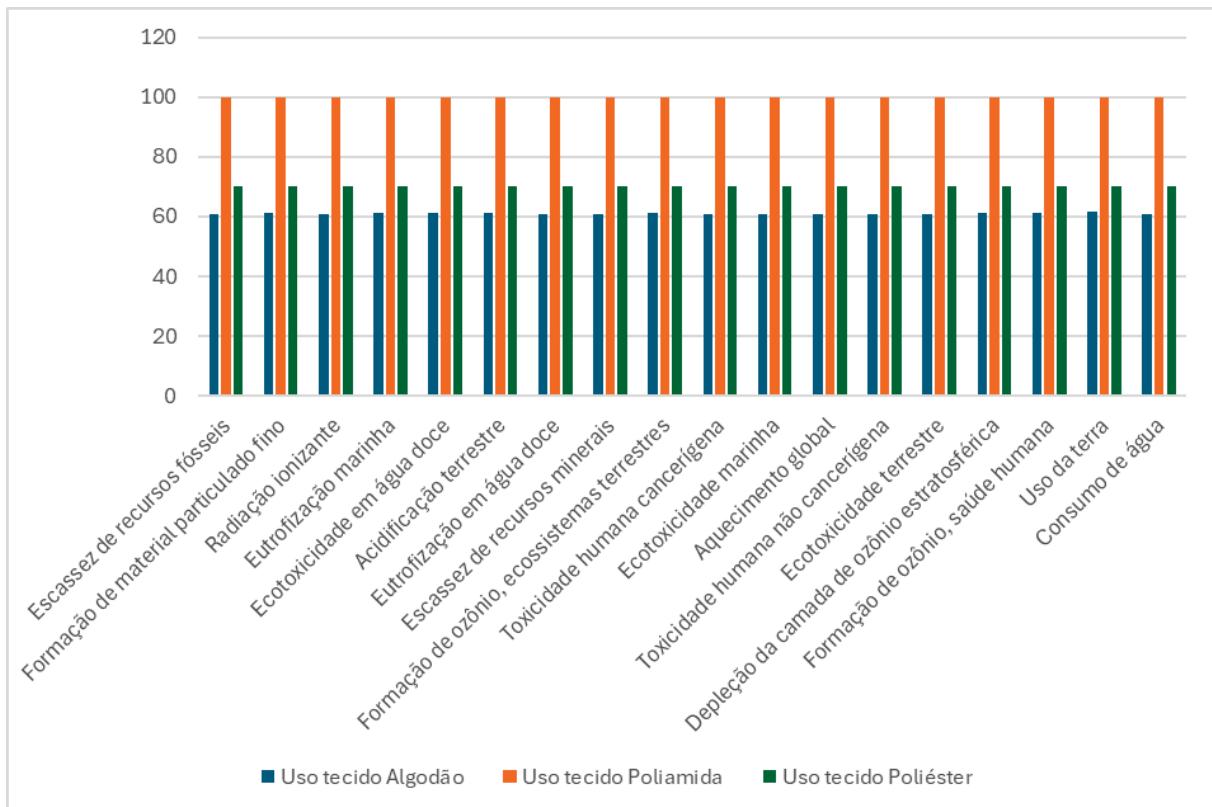
Fonte: (Autoria Própria, 2025)

De forma geral, os impactos são dominados por dois fatores principais: o uso de água e energia elétrica para a lavagem dos tecidos, que são constantes entre os cenários (ambos os tecidos são lavados no mesmo ciclo de lavagem, com a mesma quantidade de água e consumo de energia). No entanto, ainda é possível observar variações significativas entre os tecidos, especialmente nas categorias relacionadas à toxicidade e ecotoxicidade.

- Tecidos sintéticos (poliamida e poliéster) tendem a apresentar maiores impactos:
 - Em toxicidade humana não cancerígena, a poliamida apresenta o maior valor absoluto: 0,0132 kg 1,4-DCB eq, seguida do poliéster com 0,0093, e por último o algodão com 0,0081.
 - Em ecotoxicidade terrestre, a poliamida também lidera com 0,0342 kg 1,4-DCB eq, seguida pelo poliéster (0,0240) e algodão (0,0209).
 - Nas categorias de formação de ozônio (ecossistemas e saúde humana) e radiação ionizante, os tecidos sintéticos também demonstram maior contribuição, o que pode ser atribuído ao maior uso de energia elétrica e maior complexidade na cadeia produtiva.
- O algodão destaca-se em:
 - Consumo de água, com o menor valor entre os três tecidos (0,00154 m³), embora a diferença para o poliéster (0,00177 m³) não seja tão expressiva.
 - Também apresenta o menor impacto em ecotoxicidade marinha, acidificação terrestre e formação de material particulado fino, reforçando seu potencial mais favorável do ponto de vista ambiental

em alguns aspectos ainda que sua produção agrícola possa gerar impactos importantes (não avaliados neste recorte).

Gráfico 5. Normalização Interna dos Tecidos (Algodão, Poliamida e Poliéster).



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

O Gráfico 5 apresenta os dados normalizados internamente, permitindo uma comparação relativa entre os tecidos em cada categoria de impacto. Para essa normalização, foi considerado o maior valor absoluto como 100% dentro de cada categoria, com os demais expressos como porcentagem desse valor. O Gráfico 5 evidencia que o tecido de poliamida apresenta os maiores impactos ambientais relativos em todas as categorias analisadas. Isso significa que, embora os processos de lavagem sejam idênticos entre os cenários, as características físico-químicas da poliamida, principalmente no que se refere a sua maior gramatura, fazem com que o impacto ambiental durante a lavagem seja mais significativo.

Na sequência, aparece o poliéster, que também apresentou impactos ambientais relevantes, especialmente em categorias como “Radiação ionizante” e “Depleção da camada de ozônio estratosférica”. Isso pode estar relacionado ao uso

de determinadas fontes de energia ou emissões específicas no ciclo de vida do poliéster que influenciam esses mecanismos de impacto.

Já o algodão apresentou consistentemente os menores valores normalizados, o que indica menor impacto relativo, principalmente nas categorias relacionadas à toxicidade e escassez de recursos. De forma resumida, o que foi percebido, no caso do processo de lavagem, é que a gramatura do tecido influencia bastante o impacto ambiental final do tecido, dado que, tecidos com maior gramatura acabam sendo mais pesados para uma mesma área como fluxo de referência, acarretando em um maior consumo de água e de energia proporciona pela máquina de lavar, dado que estes parâmetros estão ligados diretamente a quantidade de peso a ser lavado. Vale ainda ressaltar que, para esta análise inicial com o método ReCiPe Midpoint (H) não foram considerados os possíveis efeitos físicos na biota oriundos das microfibras desprendidas na água, e que são tratadas na seção 5.2.1.

Estudos prévios, como os de Napper & Thompson (2016) e Pirc *et al.* (2016), indicam que uma única lavagem doméstica pode liberar entre dezenas e centenas de milhares de microfibras para o ambiente, corroborando que os impactos associados à fase de lavagem não se restringem ao consumo de água e energia, mas incluem também a geração significativa de resíduos sólidos microscópicos. A literatura ainda mostra que o desprendimento de fibras tende a ser maior nas primeiras lavagens e sob condições de temperatura elevada e uso de detergente, fatores que também contribuem para categorias de impacto como ecotoxicidade aquática.

A influência da gramatura do tecido, identificada como um fator relevante no aumento do impacto ambiental, encontra respaldo em Choi *et al.* (2022), que destacam que propriedades físicas e estruturais dos tecidos afetam diretamente a resistência à lavagem e, consequentemente, a liberação de microfibras e o consumo de recursos. Essa relação ajuda a explicar os maiores impactos da poliamida, tecido de maior gramatura entre os avaliados, mesmo sob condições idênticas de lavagem.

4.4.2 Resultados Usando o Método de Avaliação de Impacto ReCiPe 2016 Endpoint (H)

A abordagem Endpoint do método ReCiPe 2016 fornece uma visão agregada dos impactos ambientais ao reunir os efeitos em três categorias de dano: qualidade

dos ecossistemas, saúde humana e recursos naturais. Isso permite avaliar a significância dos impactos, sendo especialmente útil para tomada de decisões.

A Tabela 19 apresenta os resultados da avaliação dos três tecidos (algodão, poliamida e poliéster), já convertidos para as unidades padrão de cada categoria: DALY (anos de vida ajustados por incapacidade) para saúde humana, species.yr (redução no tempo de presença de espécies) para ecossistemas, e USD2013 para os custos associados à extração de recursos naturais. Vale ressaltar que, nesta Tabela 19, já são incorporados os resultados do impacto na categoria de efeitos físicos na biota, que trata da quantificação do impacto das microfibras desprendidas na água de lavagem. Estes resultados são apresentados em três cenários distintos, sendo chamados de: Melhor caso, Caso médio e Pior caso. Estes cenários foram estabelecidos por Corella-Puertas *et al.* (2023) e buscam representar o fator de caracterização médio estimado pelo projeto MARILCA para a respectiva categoria de impacto, bem como os fatores de caracterização para o limite superior e inferior de 95% em relação a média para o Pior caso e Melhor caso, respectivamente.

Tabela 19. Resultados da Análise de Impacto Ambiental Usando o Método de Avaliação de Impacto ReCiPe 2016 Endpoint (H).

CATEGORIA DE IMPACTO	UNIDADE DE REFERÊNCIA	RESULTADO ALGODÃO	RESULTADO POLIAMIDA	RESULTADO POLIÉSTER
Ecotoxicidade marinha	species.yr	4,00331E-14	6,56402E-14	4,6064E-14
Aquecimento global, ecossistemas terrestres	species.yr	6,33188E-12	1,03832E-11	7,28469E-12
Formação de material particulado fino	DALY	2,92501E-09	4,79531E-09	3,36483E-09
Toxicidade humana não carcinogênica	DALY	1,84397E-09	3,02321E-09	2,12158E-09
Eutrofização em água doce	species.yr	1,97323E-12	3,23522E-12	2,27034E-12
Consumo de água, saúde humana	DALY	3,42983E-09	5,62354E-09	3,94632E-09

<i>Eutrofização marinha</i>	species.yr	1,24664E-14	2,04336E-14	1,4339E-14
<i>Radiação ionizante</i>	DALY	9,02996E-13	1,48068E-12	1,03915E-12
<i>Toxicidade humana carcinogênica</i>	DALY	2,82764E-09	4,63693E-09	3,25398E-09
<i>Ecotoxicidade em água doce</i>	species.yr	2,04197E-13	3,34731E-13	2,34902E-13
<i>Depleção da camada de ozônio estratosférico</i>	DALY	2,33312E-12	3,82042E-12	2,68133E-12
<i>Uso da terra</i>	species.yr	1,18522E-12	1,9256E-12	1,35133E-12
<i>Escassez de recursos minerais</i>	USD2013	6,23651E-06	1,02258E-05	7,17613E-06
<i>Acidificação terrestre</i>	species.yr	2,3287E-12	3,8162E-12	2,67765E-12
<i>Aquecimento global, saúde humana</i>	DALY	2,09888E-09	3,44182E-09	2,41472E-09
<i>Ecotoxicidade terrestre</i>	species.yr	2,38209E-13	3,90578E-13	2,74099E-13
<i>Formação de ozônio, ecossistemas terrestres</i>	species.yr	7,09868E-13	1,16359E-12	8,16446E-13
<i>Consumo de água, ecossistema terrestre</i>	species.yr	2,08571E-11	3,41972E-11	2,39979E-11
<i>Consumo de água, ecossistemas aquáticos</i>	species.yr	9,33161E-16	1,53001E-15	1,07368E-15
<i>Formação de ozônio, saúde humana</i>	DALY	4,83899E-12	7,93187E-12	5,56541E-12
<i>Aquecimento global,</i>	species.yr	1,72954E-16	2,83615E-16	1,98979E-16

ecossistemas de água doce				
Escassez de recursos fósseis	USD2013	0,000110345	0,000181021	0,000126976
Efeitos físicos na biota (Pior caso)	species.yr	2,59E-15	5,60E-14	3,35E-13
Efeitos físicos na biota (caso médio)	species.yr	1,76E-16	1,11E-15	5,54E-15
Efeitos físicos na biota (Melhor caso)	species.yr	1,20E-17	2,21E-17	9,18E-17

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

A análise dos dados evidencia que, assim como no nível Midpoint, conforme já esperado, a poliamida apresentou os maiores impactos em todas as categorias do método ReCiPe Endpoint (H). Por exemplo, na categoria Aquecimento Global – Saúde Humana, os impactos da poliamida (3,44E-09 DALY) foram significativamente superiores aos do algodão (2,09E-09 DALY) e poliéster (2,41E-09 DALY). O mesmo padrão se repetiu para Formação de Material Particulado Fino, Toxicidade Humana (carcinogênica e não carcinogênica) e Radiação Ionizante, evidenciando que a poliamida apresenta maiores riscos à saúde humana.

No endpoint Ecosystem Quality, a poliamida também liderou nas categorias de Ecotoxicidade em água doce, Eutrofização em água doce, Uso da terra e Acidificação terrestre. Por exemplo, em “Ecotoxicidade terrestre”, a poliamida atingiu 3,90E-13 species.yr, frente a 2,38E-13 do algodão e 2,74E-13 do poliéster. Isso indica que o impacto da poliamida na biodiversidade e no funcionamento dos ecossistemas é potencialmente mais severo.

Em relação à categoria de Recursos, os valores seguem a mesma tendência. A escassez de recursos fósseis, medida em dólar equivalente, apresentou valores mais altos para a poliamida (0,000181 USD2013), seguida do poliéster (0,000126 USD2013) e algodão (0,000110 USD2013). O mesmo ocorreu para a categoria de escassez de recursos minerais.

Por fim, a adição da categoria “Efeitos físicos na biota”, estimada com base na massa desprendida de cada tecido e seu fator de caracterização (obtido do

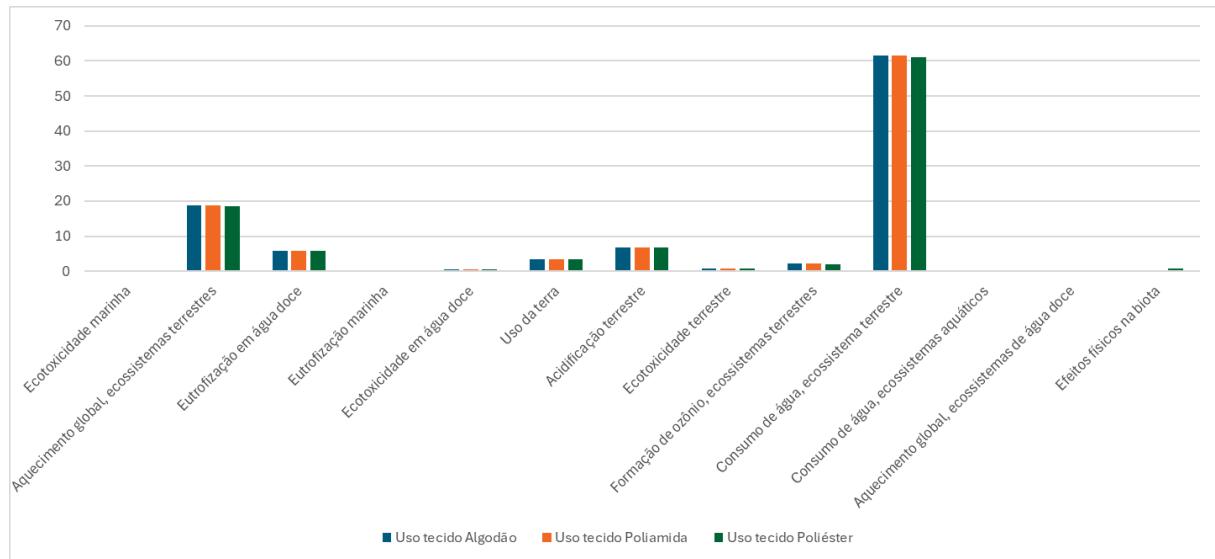
MarILCA) para o melhor, médio e pior caso, permitiu um complemento sobre os potenciais danos específicos das microfibras, o que ainda é algo pouco aplicado nos estudos de ACV. Vale destacar que esta categoria foi incorporada ao endpoint de Ecosystem quality.

Com base nos dados da Tabela 19, tem-se os resultados dos Efeitos físicos na biota para os três cenários analisados:

- Melhor caso: os valores de species.yr são extremamente baixos (na ordem de 10^{-17} a 10^{-15}), com impacto muito baixos em todos os tecidos.
- Caso médio: observa-se um leve aumento, com o poliéster alcançando 5,54E-15 species.yr, valor ainda pequeno em relação ao restante do endpoint.
- Pior caso: mesmo com os maiores fatores de caracterização, o impacto relativo ainda representa, no máximo, 0,85% do valor total do endpoint Ecosystem Quality, no caso do poliéster. Para algodão e poliamida, esse incremento é ainda menor.

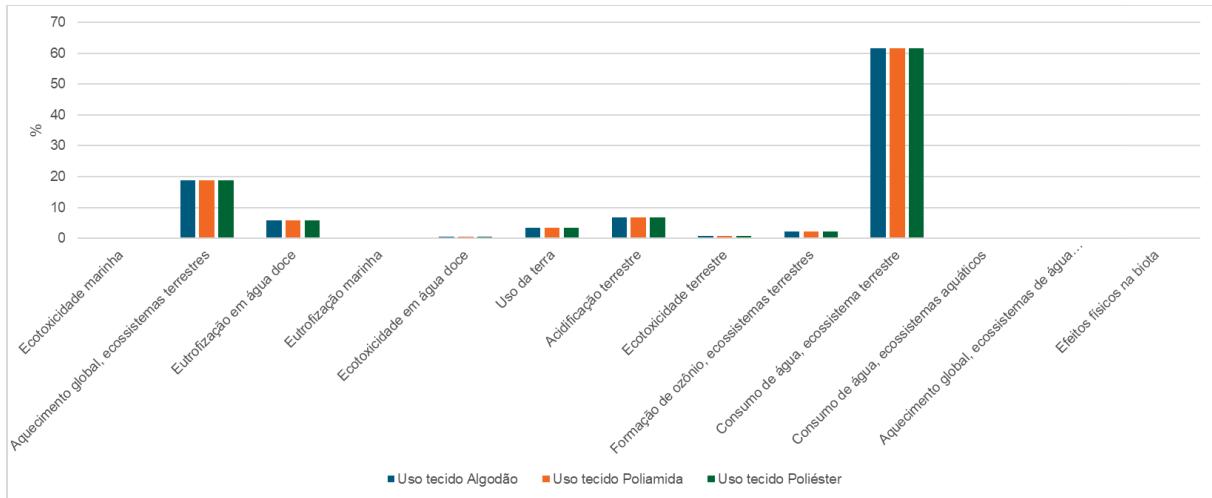
Os Gráficos 6, 7 e 8 abaixo ilustram o efeito incremental dessa categoria dentro do endpoint Ecosystem Quality nos três cenários.

Gráfico 6. Melhor Caso - Inclusão da Categoria Efeitos Físicos na Biota no Endpoint de Ecosystem Quality para os Tecidos de Algodão, Poliamida e Poliéster.



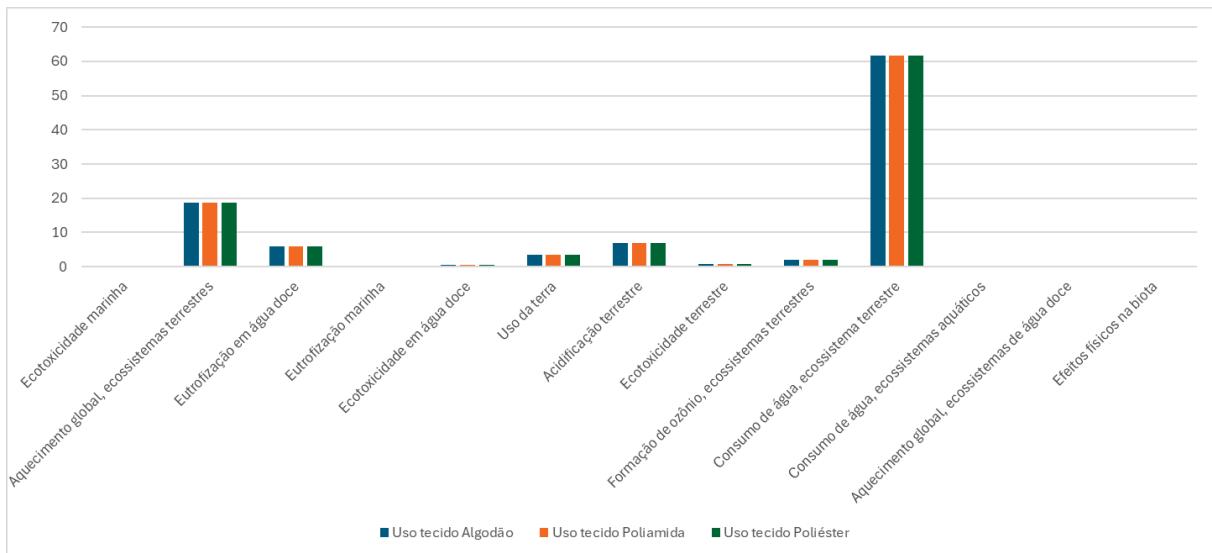
Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Gráfico 7. Caso Médio - Inclusão da Categoria Efeitos Físicos na Biota no Endpoint de Ecosystem Quality para os Tecidos de Algodão, Poliamida e Poliéster.



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Gráfico 8. Pior Caso - Inclusão da Categoria Efeitos Físicos na Biota no Endpoint de Ecosystem Quality para os Tecidos de Algodão, Poliamida e Poliéster.



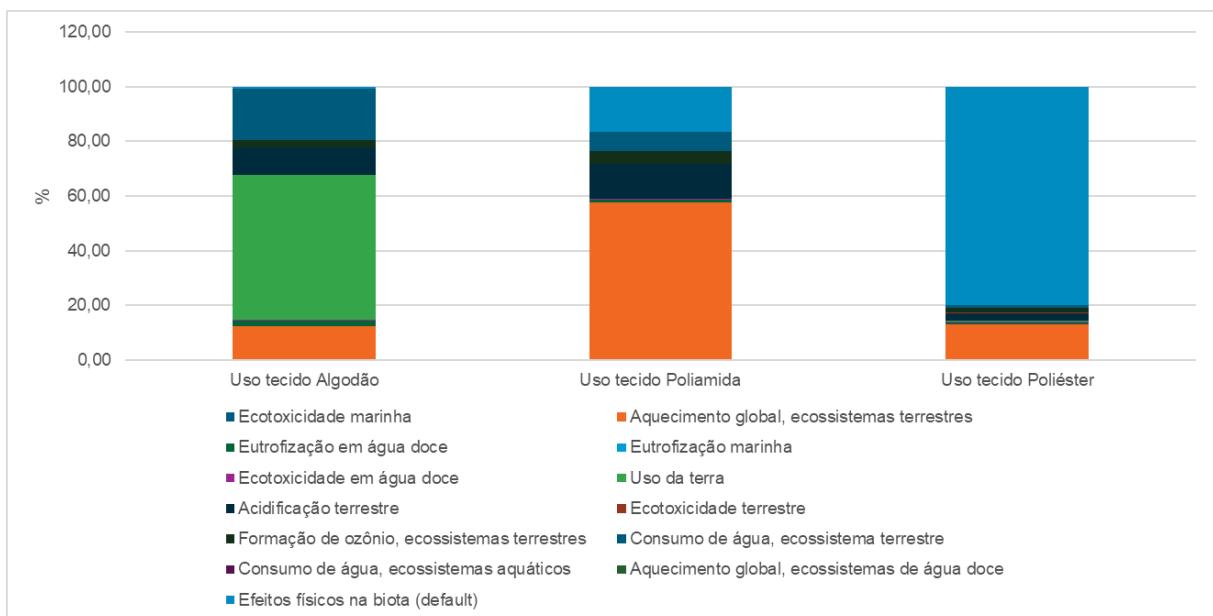
Fonte: (Autoria Própria, 2025)

Analizando estes Gráficos, observou-se que, mesmo no cenário de pior caso, no qual foram aplicados os maiores fatores de caracterização para os efeitos físicos na biota, a contribuição dessa categoria para o endpoint Ecosystem Quality permanece bastante limitada. No tecido de poliéster, que apresentou o maior valor entre os analisados, o acréscimo máximo foi de apenas 0,85% em relação ao total do endpoint.

Esse resultado reforça que os impactos globais da lavagem doméstica são fortemente determinados pelo uso de água e energia elétrica, variáveis que são constantes entre os diferentes tecidos. Por isso, os resultados da ACV são muito semelhantes entre os cenários. As diferenças observadas entre os tecidos se devem, sobretudo, às características específicas das microfibras liberadas durante a lavagem, tanto em quantidade quanto em composição química, que influenciam os impactos potenciais ao meio ambiente.

Como última análise, no gráfico 9, são representados os resultados obtidos isolando somente o impacto ambiental ocasionado pelo consumo e perda do tecido em cada lavagem (massa desprendida de tecido), para cada categoria que compõe o endpoint de Ecosystem quality, e adicionado os impactos da categoria de efeitos físicos na biota (caso médio).

Gráfico 9. Importância de cada Endpoint para cada Tecido.



Fonte: (Autoria Própria, 2025)

O Gráfico 9 mostra que os resultados de impacto da categoria de efeitos físicos na biota incrementam um impacto total da categoria de dano de Qualidade do ecossistema em torno de 0,85% para o algodão, 16,5% para a poliamida e 79,85% para o poliéster, mostrando que as microfibras elevam de uma forma significativa os impactos ambientais potenciais, principalmente das fibras sintéticas. Porém, quando se analisa o impacto dos efeitos físicos na biota em relação a todos os processos da

lavagem (água, energia e tratamento do efluente), aí percebe-se que este impacto praticamente some (chega no máximo a 0,1% do impacto da categoria). Isso revela que, embora os impactos diretos das microfibras pareçam importantes do ponto de vista do consumo e desprendimento de polímero de tecido, eles ainda são quantitativamente menores frente aos impactos sistêmicos do ciclo de vida da lavagem.

Os resultados do método ReCiPe 2016 Endpoint (H) estão alinhados com o que foi observado na análise Midpoint, destacando maiores danos associados às fibras sintéticas, em especial a poliamida, nas áreas de saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos. Estudos como o de Cesa (2017) confirmam que tecidos sintéticos, como poliamida e poliéster, apresentam desprendimento relevante de microfibras e elevada persistência ambiental, fatores que amplificam seu potencial de toxicidade e ecotoxicidade. Cesa também identificou que, apesar de o algodão apresentar liberação maior em massa, fibras naturais tendem a ter menor persistência e, consequentemente, menor contribuição para danos ecotoxicológicos, corroborando os resultados deste trabalho. A abrangência desses danos, observada nos impactos de Endpoint, reforça a crescente preocupação abordada na introdução deste estudo sobre a presença e o impacto dos microplásticos (MPs) e nanoplásticos (NPs) em diversos compartimentos, desde corpos marinhos até alimentos e bebidas de consumo humano, e mais alarmantemente, na placenta humana e no leite materno. Esses achados em Endpoint, particularmente nas categorias de saúde humana e qualidade dos ecossistemas, tangibilizam os riscos potenciais para as futuras gerações, ecoando as preocupações levantadas por Bugatti *et al.* (2023) e Fonseca *et al.* (2022) sobre a contaminação global e a necessidade urgente de estratégias de gerenciamento para a poluição plástica marinha. A persistência ambiental das microfibras sintéticas, um fator-chave nos impactos de Endpoint, está intrinsecamente ligada aos seus processos de degradação polimérica, ou à ausência de degradação efetiva no ambiente, conforme discutido por Lima, Moreira e Araújo (2022).

5 CONCLUSÃO

Este estudo buscou compreender os impactos ambientais associados ao desprendimento de microfibras têxteis durante lavagens domésticas, analisando tecidos de algodão, poliéster e poliamida. Por meio da caracterização física dos artigos têxteis incluindo peso seco, gramatura, regain, estrutura e densidade linear foi possível identificar diferenças significativas entre os tecidos que influenciam diretamente sua interação com o ambiente. As fibras sintéticas, como poliéster e poliamida, apresentaram maiores potenciais de impacto ambiental, sobretudo em categorias relacionadas à ecotoxicidade e toxicidade humana, conforme evidenciado pelas análises de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com os métodos ReCiPe Midpoint e Endpoint. Já o algodão, por ser uma fibra natural e biodegradável, demonstrou menores impactos para os métodos analisados.

Apesar de o uso de água e energia dominar os impactos globais da fase de lavagem, os resultados evidenciaram que as características estruturais dos tecidos e a massa desprendida possuem influência significativa nos danos à qualidade dos ecossistemas. A inclusão da categoria “efeitos físicos na biota”, derivada da liberação de microfibras, reforçou a relevância ambiental dessas partículas, principalmente em tecidos sintéticos como o poliéster, embora o impacto agregado dessa categoria ainda represente uma fração pequena frente ao ciclo completo de lavagem.

A problemática do desprendimento de microfibras em lavagens domésticas insere-se na crise global dos microplásticos, cujas consequências ambientais e para a saúde humana são cada vez mais evidentes e preocupantes, com a detecção dessas partículas em diversos ecossistemas e até mesmo no corpo humano, conforme amplamente discutido na literatura. Este estudo contribui para a quantificação de um aspecto específico dessa complexa poluição, fornecendo dados para um melhor entendimento dos impactos associados aos materiais têxteis.

Contudo, é importante reconhecer as limitações inerentes a este estudo, como a realização das lavagens em condições controladas de laboratório, que podem não replicar completamente a variabilidade das práticas domésticas reais. Além disso, a avaliação dos impactos de micro e nanoplásticos na ACV ainda é um campo em desenvolvimento, com desafios metodológicos persistentes na quantificação de todos os seus efeitos. Para pesquisas futuras, sugere-se a expansão da análise para uma gama mais ampla de tipos de tecidos e misturas, a investigação do impacto de

diferentes tipos de máquinas de lavar e detergentes, e o aprimoramento de modelos de ACV para uma representação mais precisa dos danos ecológicos e toxicológicos dos microplásticos liberados no ambiente.

Em suma, este trabalho destaca a importância de considerar não apenas o consumo de recursos, mas também o desprendimento de microfibras como um fator determinante na avaliação dos impactos ambientais de produtos têxteis. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de práticas mais sustentáveis tanto na indústria quanto no cotidiano dos consumidores, e apontam para a urgência de medidas que mitiguem a potencial poluição gerada pelas lavagens de artigos têxteis.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 12744: Fibras têxteis – Classificação. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. (2018). NBR ISO 14044: Análise do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE ALGODÃO (ABRAPA). Estimativas para a safra de algodão 2024/25. Brasília, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10588: identificação e simbologia das fibras têxteis*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABIT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. Perfil do setor. 2024. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>.
- AGÊNCIA BRASIL. Brasil gerou 64 quilos de resíduos plásticos por pessoa em 2022. Agência Brasil, Brasília, DF, 14 mar. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-03/brasil-gerou-64-quilos-de-residuos-plasticos-por-pessoa-em-2022#:~:text=Dados%20do%20Panorama%20dos%20Res%C3%ADduos,quilos%20por%20pessoa%20no%20ano>
- ALMEIDA, LRO; OTTONI, JR; PASSARINI, MRZ Plásticos no ambiente marinho frio: uma revisão do potencial de biodegradação microbiana. Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento, [S. I.], v. 3, pág. E49310313642, 2021. DOI: 10.33448/rsd v10i3.13642.]
- ALMROTH, B.M.C., ASTROM, L., ROSLUND, S. *et al.* Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles; a source of microplastics released into the environment. Environ Pollut Res 25, 1191–1199 (2018). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0528-7>.
- ALVES, F. M. A Relação Entre a Motivação e o Desempenho dos Professores do Ensino Fundamental. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, SP, 2017.
- ALVES, N. L.; *et al.* Estudo do efeito da incorporação de nanocelulose bacteriana na biodegradabilidade de filmes de poli(l-ácido láctico). Revista Polímeros, v. 22, n. 1, p. 1-10, 2012. DOI: 10.1590/S0104-14282012000100003.
- ALVES, M. J. S.; SILVA, A. R. Gestão de Pessoas e Performance Organizacional: Um Estudo Empírico em Empresas Portuguesas. Revista Administração Pública, Rio de Janeiro, v. 40, n. 1, p. 11-36, jan./fev. 2006. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rh/pdf/v40n1.pdf>.
- ALONSO-SERRA, G.; DE GISI, S.; ALIBARDI, L. *MarILCA characterization factors for microplastic impacts in life cycle assessment: Physical effects on biota from emissions to aquatic environments*. Journal of Cleaner Production, v. 418, 15 set. 2023, 138197.
- Agência Brasil. (2023, 21 de março). Brasil gerou 64 quilos de resíduos plásticos por pessoa em 2022. Agência Brasil, Brasília, DF.
- Aquino, M. S. (2008). Apostila de Métodos e Processos de Manufatura da Malha I. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Têxtil.
- ARAUJO, M. C. B., Dieta indigesta: milhares de animais marinhos estão consumindo plásticos. Revista Meio Ambiente e sustentabilidade, v.10, nº5. 2016. Disponível em: <https://www.uninter.com/revistameioambiente/index.php/meioAmbiente/article/view/511>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ACV de embalagens de vidro. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 44 p. (NBR 16807:2014).

- BASTIDAS, O. Cell Counting with Neubauer Chamber: Basic hemocytometer usage. Technical Note.
- BBC NEWS BRASIL. A indústria da moda e o impacto ambiental: 5 fatos para você conscientizar. [S.I.], 2022. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral/54198647#:~:text=Quando%20somada%2C%20a%20quantidade%20de,de%20roupas%20com%20fibras%20sint%C3%A9ticas>. BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).
- BUGATTI, Cauê; ALMEIDA, Karine Cristine de; GUIMARÃES, Mônica Soares de Araújo; AMÂNCIO, Natália de Fátima Gonçalves. Microplásticos e Nanoplásticos e sua relevância na saúde humana: uma revisão de literatura. *Research, Society and Development*, v. 12, n. 1, e6712139302, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39302>.
- CESA, F.S. Micropásticos têxteis: emissão de fibras sintéticas na lavagem doméstica. Universidade Estadual de São Paulo, 2017. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100133/tde-19102017-105403/publico/versaocorrigidaflaviacesa.pdf>.
- CENTRO DE ESTUDOS EM SUSTENTABILIDADE DA UFRGS. ACV como Instrumento de Gestão. Porto Alegre: CETEA-UFRGS, 2014. 44 p.
- CHOI, D.; KIM, J.; SHIN, H.. *Factors Influencing Microfiber Release during the Washing of Synthetic Textiles*. ACS Environmental Science & Technology, v. 56, n. 7, p. 4495-4504, 2022.
- CRAWFORD, M. *The World in a Plastic Bag: A Global History*. New York: Penguin Books, 2009.
- CONAB. 12º Levantamento da Safra de Algodão 2023/24. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, setembro 2024.
- CONAB. Projeções para a safra de algodão 2024/25. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2025.
- CONMETRO.** *Regulamento Técnico Mercosul sobre Etiquetagem de Produtos Têxteis – Resolução GMC nº 33/2007*. Brasília: Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, 2008.
- ECYCLE. Algodão. [S.I.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/algodao/#:~:text=O%20algod%C3%A3o%20%C3%A9%20uma%20fibra%20natural%20derivada%20da%20planta%20do,e%20o%20hibisco%2C%20a%20Malvaceae>.
- ECYCLE. Poliéster. [S.I.], [s.d.]. Disponível em: <https://dle.rae.es/inv%C3%A1lido>.
- ECYCLE. Poliéster. [S.I.], 2023. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/poliester/#:~:text=Al%C3%A9m%20disso%20alguns%20tipos%20de,m%C3%A1quina%20de%20lavar%20prejudicando%20ecossis%20temas>.
- FAVA, J. A.; CONNORS, S.; VITTO, C. Life-cycle assessment: a framework for environmental performance evaluation. *Environmental Science & Technology*, v. 25, n. 2, p. 167–175, 1991.
- FIATKOSKI, MARCELO VITOR. (2022). R - D - MARCELO VITOR FIATKOSKI.pdf. Universidade Federal do Paraná (UFPR).
- FONSECA, T.; AGOSTINHO, F.; PAVÃO, J.M.S.J.; SULIS, F.; MACENO, M.M.C.; ALMEIDA, C.M.V.B.; GIANNETTI, B.F. Marine plastic pollution: A systematic review of management strategies through a macroscope approach. *Marine Pollution Bulletin*, Amsterdam, v. 208, e117075, nov. 2024.
- GBLJEANS. Cresce uso de poliéster na produção têxtil. 2023. Disponível em: <https://gbljeans.com.br/mercado/internacional/cresce-uso-de-poliester-na-producao-textil/>.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, v. 3, n. 7, e1700782, 19 jul. 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782

LEGNAIOLI, Stella. Impacto ambiental das roupas: entenda os impactos das fibras têxteis e conheça alternativas sustentáveis. eCycle, 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/impacto-ambiental-das-roupas/>

MARILCA.ORG. MariLCA: Marine Litter in Life Cycle Assessment.: MariLCA.org, [s.d.]. Disponível em: <https://marilca.org/#blog>.

MRE FERRAMENTAS. Lupa Conta-Fios Metal LED Solver SLF-130M. [S.I.]: MRE Ferramentas, [2025]. Disponível em:

<https://www.mreferramentas.com.br/ferramentas/lupas/lupa-conta-fios/lupa-conta-fios-metal-led-solver-slf-130m?srsltid=AfmBOori9awRlcaUeHPxIPa9nCKM75ABGENTpaNDLVuRQDoMER37Y1rf>.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO SÃO FRANCISCO. PORTAL DE SUSTENTABILIDADE. Impactos Ambientais das Fibras Têxteis e Alternativas. [S.I.], 2018. Disponível em: <https://portais.univasf.edu.br/sustentabilidade/noticias/sustentaveis/impactos-ambientais-das-fibras-texteis-e-alternativas>.

GESAMP. Sources, fate and effects of micrplastics in the marine environment: A global assessment. (Kershaw, P. J. and Rochman, C. M., eds) (IMO/FAO/UNESCO IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on The Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) Rep. Stud. GESAMP No.93, 220 p.16, 2016.

GUINÉE, J. B. et al. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 1, p. 90–96, 2011.

GOMBRICH, E. H. História da Arte. 16ª ed. São Paulo: Editora WMF Martins Fontes, 2002. 720 p.

HERTWIG, L.; LOPES, J. C.; SANTOS, R. L. Interpretation in life cycle assessment: challenges and best practices. *Journal of Cleaner Production*, v. 234, p. 1234–1245, 2019.

KUASNE, A. Fibras têxteis. 2008. Disponível https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/8/88/Apostila_fibras.pdf.

PEREIRA, G.S. Introdução à tecnologia têxtil. 2008. Disponível em: https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/images/7/7d/Apostila_tecnologia.pdf

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN). (2023). Repositório Institucional do IPEN. IPEN.

IEMI. Brasil Têxtil aponta alta no consumo de fibras têxteis em dez anos. 2024. Disponível em: <https://iemi.com.br/brasil-textil-aponta-alta-no-consumo-de-fibras-texteis-em-dez-anos/>.

HANDZ. Algodão ecológico e biodegradável. [S.I.], 2023. Disponível em: <https://handz.com.br/blogs/novidades/algodao-ecologico-e-biodegradavel>.

COSTA, J. P.; DUARTE, A. C.; ROCHA SANTOS, T. Plásticos no ambiente. *Revista Recursos Hídricos*, v. 40, n. 1, p. 9-24, 2019.

KLÖPFFER, W.; GRAHL, B. Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice. Weinheim: Wiley-VCH, 2014.

LIMA, Tais Moura Pereira de; MOREIRA, Bruna Galdino; ARAUJO, Ana Clara. Impactos da degradação do plástico no meio ambiente e na saúde humana: uma revisão. 2022. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos) – Faculdade de Tecnologia de Campinas, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Campinas, 2022. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/11890>.

MERCIA, E. Avaliação da Qualidade de Vida em Doentes com Doença Pulmonar Obstrutiva Crónica. Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2016.

MISHRA, S., RATH, C.C., DASS, A. P. Marine microfiber pollution: a review on present status and future challenges. *ScienceDirect*, v.140, p.188-197, 2019.

MOORE, C. J. Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat. *Environmental Research*, v. 108, p.131–139. 2008.

NAPPER, Imogen E.; THOMPSON, Richard C. *Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions*. *Marine Pollution Bulletin*, v. 112, n. 1-2, p. 39-45, 2016.

OLIVEIRA, Pedro. *Guia prático de instrumentos ópticos*. São Paulo: Editora Alpha, 2017.

PIRC, U.; VIDMAR, M.; MOZER, A.; KRZAN, A. Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic laundry. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, p. 22206-22211, 2016.

SCIENCECIRECT. Biodegradable polyester. In: *ScienceDirect Topics*. Elsevier. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/biodegradable-polyester>

SENAI CETIQT. Manual 1: Fibras. [S.I.]: SENAI CETIQT, 2015. Disponível em: https://issuu.com/senaitextilvestuario/docs/manual1_fibras#google_vignette.

SILVA, M. G.; et al. Avaliação da atividade antimicrobiana de óleos essenciais de plantas medicinais contra microrganismos multirresistentes. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, v. 4, n. 1, p. 135-147, 2014.

SILVA, M. J. C. Análise da Relação entre o Clima Organizacional e o Desempenho Individual dos Colaboradores. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Empresas) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013. Disponível em: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/37297/1/ulfd136349_tese.pdf.

SILVA, M. J. C. Análise da Relação entre o Clima Organizacional e o Desempenho Individual dos Colaboradores. *Revista Administração em Diálogo*, São Paulo, v. 27, n. p. 105-120, jan./abr. 2015. <https://www.redalyc.org/pdf/3312/331227111005.pdf>.

Smith, J. R.; Johnson, A. B. Natural and Synthetic Fibers: A Comparative Study. *Journal of Textile Science*, 15(2), 78-89, agosto de 2023.

SPADOTTO, J. C. Classificação de Impacto Ambiental. *Boletim da Sociedade Brasileira de Cardiologia Pediátrica e Cardiopatia Congênita* (Sociedade Brasileira de Cardiologia Pediátrica e Cardiopatia Congênita), v. 20, n. 2, p. 113-120, 2002.

SYNGENTA. Algodão 2023/24: expectativas da safra e panorama das lavouras. [S.I.], 2023. Disponível em: <https://maisagro.syngenta.com.br/mercado-e-safra/algodao-2023-24-expectativas-da-safra-e-panorama-das-lavouras/#:~:text=0%20relat%C3%B3rio%20do%20Comit%C3%AA%20Consultivo,e-m%20rela%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A0safra%20anterior>.

THE INVENTORS. The History of Polyester. The Inventors. Disponível em: <https://theinventors.org/library/inventors/blpolyester.htm>

TRIOLA, Mario F. **Introdução à Estatística**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

VANRULLEN, R.; DUCHAINE, B.; WANG, L.; KARLSSON, J. K.; GOUVEIA, A. R.; ROELANTS, H. A Neural Network Model of Visual Attention. *Vision Research*, Amsterdam, v. 165, p. 10-20, dez. 2019. Disponível <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X19300451>.

VASCONCELOS, Yuri. *Planeta plástico. Revista Pesquisa FAPESP*, edição 281, jul. 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/planeta-plastico/>.

WANG, Yue; VAN PUTTEN, Robert-Jan; TIETEMA, Albert; PARSONS, J. R.; GRÜTER, Gert M. Polyester biodegradability: importance and potential for optimisation. *Green Chemistry*, v. 26, p. 3698–3716, 2024. DOI: 10.1039/D3GC04489K. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/gc/d3gc04489k>.

WORLD WILDLIFE FUND. (2020). Indústria da moda: impactos e soluções. WWF Brasil. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/>.

APÊNDICE 1 – TABELAS COM DADOS DE FILTRAGEM DO POLIÉSTER

Tabela 20. Dados filtragem do Poliéster

LAVAGEM	POLIÉSTER			
	Peso do filtro limpo	Peso efluente seco	Diferença	Média
1	0,0952	0,0965	0,0013	
1	0,0938	0,0947	0,0009	0,001066667
1	0,0932	0,0942	0,001	
2	0,0905	0,0905	0	
2	0,0943	0,0948	0,0005	0,0002
2	0,0944	0,0945	0,0001	
3	0,0899	0,0902	0,0003	
3	0,0879	0,0882	0,0003	0,0003
3	0,089	0,0893	0,0003	
4	0,092	0,0923	0,0003	
4	0,0903	0,0906	0,0003	0,000266667
4	0,0889	0,0891	0,0002	
5	0,0911	0,0914	0,0003	
5	0,089	0,0892	0,0002	0,000233333
5	0,0898	0,09	0,0002	
6	0,0885	0,0887	0,0002	
6	0,0888	0,0889	0,0001	0,000166667
6	0,0884	0,0886	0,0002	
7	0,0894	0,09	0,0006	
7	0,0895	0,0896	0,0001	0,000366667
7	0,0892	0,0896	0,0004	
8	0,0878	0,0881	0,0003	
8	0	0	0	0,0002
8	0,0887	0,089	0,0003	
9	0,0888	0,0893	0,0005	
9	0	0	0	2E-04
9	0,0901	0,0903	0,0002	
10	0,089	0,0894	0,0004	
10	0	0	0	0,000233333
10	0,0917	0,092	0,0003	

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

APÊNDICE 2 – TABELAS COM DADOS DE FILTRAGEM DO ALGODÃO

Tabela 21. Dados de Filtragem do Algodão

ALGODÃO				
LAVAGEM	Peso do filtro limpo	Peso efluente seco	Diferença	Média
1	0,0914	0,095	0,0036	
1	0,0939	0,0965	0,0026	0,003066667
1	0,0961	0,0991	0,003	
2	0,0955	0,0972	0,0017	
2	0,0955	0,0963	0,0008	0,0013
2	0,0912	0,0926	0,0014	
3	0,0907	0,0921	0,0014	
3	0,0938	0,0955	0,0017	0,001333333
3	0,0911	0,092	0,0009	
4	0,088	0,0906	0,0026	
4	0,0863	0,0878	0,0015	0,001866667
4	0,0895	0,091	0,0015	
5	0,0905	0,0931	0,0026	
5	0,0888	0,0907	0,0019	0,002233333
5	0,0918	0,094	0,0022	
6	0,0918	0,0941	0,0023	
6	0,088	0,09	0,002	0,001933333
6	0,0893	0,0908	0,0015	
7	0,0893	0,091	0,0017	
7	0,0882	0,0899	0,0017	0,0016
7	0,0902	0,0916	0,0014	
8	0,0914	0,0924	0,001	
8	0	0	0	0,000733333
8	0,0892	0,0904	0,0012	
9	0,0869	0,088	0,0011	
9	0	0	0	0,000833333
9	0,0895	0,0909	0,0014	
10	0,0866	0,0874	0,0008	
10	0	0	0	0,000666667
10	0,0888	0,09	0,0012	

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

APÊNDICE 3 – TABELAS COM DADOS DE FILTRAGEM DO POLIAMIDA

Tabela 22. Dados de Filtragem Poliamida

POLIAMIDA				
LAVAGEM	Peso do filtro limpo	Peso efluente seco	Diferença	Média
1	0,0957	0,097	0,0013	
1	0,0915	0,0925	0,001	0,0010666667
1	0,0965	0,0974	0,0009	
2	0,0893	0,0896	0,0003	
2	0,0898	0,0903	0,0005	0,0005
2	0,091	0,0917	0,0007	
3	0,0911	0,0913	0,0002	
3	0,0888	0,0891	0,0003	0,0002333333
3	0,0901	0,0903	0,0002	
4	0,0924	0,0928	0,0004	
4	0,0888	0,089	0,0002	0,0003333333
4	0,0882	0,0886	0,0004	
5	0,0887	0,0895	0,0008	
5	0,091	0,0918	0,0008	0,0006666667
5	0,087	0,0874	0,0004	
6	0,0885	0,0888	0,0003	
6	0,0886	0,089	0,0004	0,0003
6	0,0915	0,0917	0,0002	
7	0,0898	0,09	0,0002	
7	0,0891	0,0895	0,0004	0,0003333333
7	0,0887	0,0891	0,0004	
8	0,0907	0,0915	0,0008	
8	0	0	0	0,0004666667
8	0,0876	0,0882	0,0006	
9	0,0929	0,0937	0,0008	
9	0	0	0	0,0005333333
9	0,0903	0,0911	0,0008	
10	0,0908	0,0914	0,0006	
10	0	0	0	0,0004
10	0,0898	0,0904	0,0006	

Fonte: (Autoria Própria, 2025)

APÊNDICE 4 – TABELAS COM DADOS DE FILTRAGEM DO BRANCO

Tabela 23. Dados de Filtragem Branco

BRANCO				
LAVAGEM	Peso do filtro limpo	Peso efluente seco	Diferença	Média
1	0,0703	0,0702	-0,0001	
1	0,0655	0,0652	-0,0003	-0,00016666
1	0,0634	0,0633	-0,0001	
2	0,0945	0,0942	-0,0003	
2	0,0936	0,0935	-0,0001	-1E-04
2	0,0914	0,0915	0,0001	
3	0,0901	0,0901	0	
3	0,0961	0,0963	0,0002	6,66667E-05
3	0,094	0,094	0	
4	0,0904	0,0902	-0,0002	
4	0,0881	0,0884	0,0003	-3,33333E-05
4	0,0898	0,0896	-0,0002	
5	0,0884	0,0885	1E-04	
5	0,0915	0,0914	-0,0001	-6,66667E-05
5	0,0892	0,089	-0,0002	
6	0,0888	0,0891	0,0003	
6	0,0885	0,0887	0,0002	0,0002
6	0,0893	0,0894	1E-04	
7	0,0891	0,0892	0,0001	
7	0,0911	0,0912	0,0001	0,000133333
7	0,0861	0,0863	0,0002	
8	0,0895	0,0893	-0,0002	
8	0,0902	0,0902	0	4,62593E-18
8	0,0887	0,0889	0,0002	
9	0,0918	0,0919	1E-04	
9	0	0	0	-4,62593E-18
9	0,0917	0,0916	-0,0001	
10	0,0897	0,0898	0,0001	
10	0	0	0	6,66667E-05
10	0,0903	0,0904	1E-04	

Fonte: (Autoria Própria, 2025)