

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÊXTIL  
CURSO ENGENHARIA TÊXTIL

Ana Júlia Correia De Araújo

**Impactos ambientais do beneficiamento têxtil e alternativas sustentáveis através do  
conceito de *Química Verde***

BLUMENAU

2022

Ana Júlia Correia De Araújo

**Impactos ambientais do beneficiamento têxtil e alternativas sustentáveis através do conceito de *Química Verde***

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Têxtil do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e de Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil.

Orientador(a): Prof. Miguel Angelo Granato

Coorientador(a): Profa. Tania Maria Costa

BLUMENAU

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

De Araujo, Ana Julia

Impactos ambientais do beneficiamento têxtil e alternativas sustentáveis através do conceito de Química Verde. / Ana Julia De Araujo ; orientador, Miguel Angelo Granato, coorientador, Tania Maria Costa, 2022.  
63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,  
Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Beneficiamento Têxtil. 3. Impactos Ambientais. 4. Química Verde. I. Granato, Miguel Angelo. II. Costa, Tania Maria. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Ana Júlia Correia De Araújo

**Impactos ambientais do beneficiamento têxtil e alternativas sustentáveis através do conceito de *Química Verde*.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de “Bacharel em Engenharia Têxtil” e aprovado em sua forma final pelo Programa de graduação da Universidade Federal de Santa Catarina.

Blumenau, 21 de dezembro de 2022.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cátia Rosana Lange de Aguiar - Coordenadora do Curso

**Banca examinadora**

---

Prof.(a) Miguel Angelo Granato - Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof.(a) Tania Maria Costa - Co-Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Alexandre José Sousa Ferreira  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Carlos Rafael Silva de Oliveira  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pelo o dom da vida. Por me abençoar colocando pessoas incríveis e os melhores caminhos para eu trilhar. Toda honra e toda glória à Ele.

Aos meus pais, Cristina e Paulo que sempre me deram todo suporte e apoio necessário para alcançar meus objetivos. Aos meus irmãos, Vinícius e Gabriela por me ensinarem tanto ao longo do meu crescimento.

Ao meu namorado Guilherme por acreditar em mim, apoiar e sonhar junto. A sua família, Lucia Helena, Lucas e Gabriela que tenho a honra de fazer parte.

Aos meus amigos que tenho o prazer de compartilhar a vida.

A todos meus professores, orientadores, coordenadores, diretores, técnicos e demais funcionários que já passaram ao longo do meu ensino e me edificaram com o maior bem, o conhecimento.

A Universidade Federal de Santa Catarina por me acolher por 5 anos, onde tive a honra de vivenciar momentos, oportunidades e aprendizados através de um ensino gratuito de qualidade.

*"A terra pode oferecer o suficiente para satisfazer as necessidades de todos os homens, mas não a ganância de todos."*

(Mahatma Gandhi)

## RESUMO

A partir da Revolução Industrial novas demandas de consumo foram geradas em decorrência do avanço no cenário fabril. Evidentemente, essa alteração contribui de forma positiva em diversos aspectos, atrelados a avanços tecnológicos, empregos e crescente economia, mas também, de forma negativa com o uso desenfreado de recursos naturais. Dentre os muitos processos da produção de um substrato têxtil, os mais agravantes são os chamados beneficiamentos, que concebem as etapas de tratamento, tingimento e acabamento, que devido ao uso de altas quantidades de produtos químicos, água e energia, resultam em altos risco ambiental e de manuseio, além do acentuado índice poluidor. À medida que a conscientização sobre os problemas ambientais aumenta e medidas legislativas de adequação crescem, a indústria têxtil tem buscado a inserção de medidas de produção mais sustentáveis. Neste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo compreender o modo como as etapas de beneficiamento ocorrem usualmente, e analisar os potenciais e desafios dos conceitos de *Química Verde* como diretriz para mudanças ao modo de produção convencional. A natureza do trabalho está definida como bibliográfica, articulada com apoio de materiais publicados anteriormente. Através da pesquisa por medidas de substituições mais sustentáveis, foi possível analisar como as alterações são complexas, exigem pesquisa e desenvolvimento de projetos aprofundado. Em contrapartida, a transição demonstra grandes benefícios, como otimização de processos, menor consumo de matéria-prima, água e energia, conseqüentemente gastos, e que resultam em melhorias sociais, ambientais, econômicas e competitividade.

**Palavras-chave:** Cenário Fabril. Risco ambiental. *Química Verde*. Potenciais. Desafios.

## ABSTRACT

Since the Industrial Revolution started, new demands in consumption were generated due to the new methodology in the production process. Of course, this significantly improved the quality of life in the population. Still, as a side effect, the extensive use of natural resources has damaged our planet. If focusing on Textile Production, the target of this study, the most hazardous issue is related to the wet processing of the raw material used in the production. This processing is the one in the various steps as adding colors to the textile and finishing. The extensive use of water, energy, and chemical products to enable such processing results in a significant risk to the environment. Fortunately, people are more conscious, and new technics are being developed to reduce such risks. In this sense, this study aims to understand and evaluate how this processing can be less aggressive to the environment by using Green Chemistry concepts. The nature of this study is defined as bibliographical, leveraged by former studies. Throughout research for substitutes and modifications, it was possible to understand that such parameters are complex and require much more study over time. However, this transition shows a significant benefit related to the effectiveness of the process as well as lower raw material, water, and energy consumption, resulting in improvements in social, environmental, and economic competitiveness.

**Keywords:** Factory Scenario. Environmental Risk. *Green Chemistry*. Potentials. Challenges.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Demonstração do fluxo da cadeia produtiva têxtil.....	18
<b>Figura 2</b> - Principais fibras têxteis. ....	19
<b>Figura 3</b> - Processos de tratamento dos têxteis. ....	22
<b>Figura 4</b> - Comparação Algodão sem tratamento / Mercerizado.....	23
<b>Figura 5</b> - Esquema representativo Alvejamento por esgotamento. ....	25
<b>Figura 6</b> - Principais grupos cromóforos. ....	26
<b>Figura 7</b> - Exemplos de Estamparia – Cilindro, Quadro e Digital.....	27
<b>Figura 8</b> - Exemplo de entradas e saídas de processos de estamparia. ....	28
<b>Figura 9</b> - Entradas e saídas dos principais processos de acabamento têxtil. ....	29
<b>Figura 10</b> - Mecanismo chave-fechadura das enzimas. ....	38
<b>Figura 11</b> - Processos convencionais <i>versus</i> biotratamento.....	40
<b>Figura 12</b> - Métodos de aplicação do plasma. ....	43
<b>Figura 13</b> - Funcionamento do Fluido Supercrítico.....	45
<b>Figura 14</b> - Processo de tingimento <i>DyeCoo</i> com Dióxido de carbono superaquecido. ....	48

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Principais processos da fiação. ....	20
<b>Tabela 2</b> - Principais processos de Tecelagem / Malharia. ....	20
<b>Tabela 3</b> - Principais processos de Confecção. ....	21
<b>Tabela 4</b> - Principais corantes sintéticos e seus poluentes associados. ....	26
<b>Tabela 5</b> - Tratamentos com plasma comparado ao método convencional. ....	43
<b>Tabela 6</b> - Comparação do método tradicional de tingimento ao tratamento com Dióxido de carbono supercrítico. ....	47

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química

ABIT - Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAPA - Associação Brasileira dos Produtores de Algodão

ABVTEX - Associação Brasileira do Varejo Têxtil

ATCC - American Association of Textile Chemists and Colorists

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

ENGEMA - Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente

EPA - Environmental Protection Agency

ETBPP - The Environmental Technology Best Practice Programme

QV - Química Verde

IUPAC - União Internacional de Química Pura

NC-IUBMB - União Internacional de Bioquímica e Biologia Molecular.

ONU - Organização das Nações Unidas

SFC - Carbono Superfluido

SGV - Société Générale de Surveillance

ZDHC - Zero Discharge of Hazardous Chemicals

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivo Geral	16
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>16</b>
1.2	Justificativa	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>18</b>
1.1	Panorama da Cadeia Produtiva Têxtil	18
2.2	Beneficiamento Têxtil e seus impactos ambientais	21
<b>2.2.1</b>	<b>Beneficiamento Primário</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Beneficiamento Secundário</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Beneficiamento Terciário</b>	<b>28</b>
2.3	QUÍMICA VERDE	29
2.4	QUÍMICA VERDE e o Beneficiamento Têxtil	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>34</b>
4.1	Práticas Sustentáveis	34
<b>4.1.1</b>	<b>Energias alternativas</b>	<b>36</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Produtos Verdes</b>	<b>36</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Reúso de água</b>	<b>36</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Combinação de processos</b>	<b>37</b>
4.2	TECNOLOGIAS MAIS VERDES	37
<b>4.2.1</b>	<b>Enzimas no pré tratamento</b>	<b>37</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Plasma</b>	<b>42</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Fluido Supercrítico</b>	<b>45</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO GERAL</b>	<b>50</b>
5.1	Barreiras à Transição	50
5.2	Fortalecimento à Transições	51
<b>5.2.1</b>	<b>Legislações</b>	<b>52</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Certificações</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de produção têxtil industrial, que tem as etapas básicas de fiação, tecelagem, pré-tratamento, tingimento, estampagem e processos de acabamento, tem um potencial muito alto em termos de poluição ambiental. A situação é mais grave principalmente nos processos a úmido, que concebem as etapas de pré tratamento, coloração e acabamento, em função da utilização de insumos químicos e corantes nas atividades de tingimento e acabamento, devido água ser largamente necessária nos processos de lavagem, coloração, acabamento, transferência de calor, aquecimento e resfriamento (FERREIRA, 2009).

Levando em consideração que o planeta não possui capacidade para sustentar a proporção progressiva de poluição, fruto de uma produção descontrolada, é fundamental estudar quesitos envolvidos, como os riscos e custos ambientais. Nos últimos anos, a *Química Verde*, surgiu como uma ferramenta eficaz para tornar sustentável o processamento úmido de têxteis, auxiliando no desenvolvimento de químicos mais verdes e processos mais responsáveis ambientalmente (IBRAHIM, 2021). Este conceito busca desenvolver produtos mais sustentáveis, mais limpos e métodos menos dispendiosos, sem comprometer o desempenho do produto.

Para uma modificação eficiente de toda a cadeia produtiva, bem como distribuição e consumo, é fundamental a conscientização tanto do consumidor como das organizações fornecedoras. Ainda que não seja viável eliminar todos os impactos ambientais da cadeia produtiva têxtil, a sustentabilidade aplicada ao setor possibilita a viabilização em utilizar recursos de forma sensata e com uma visão de produção mais limpa, buscando alternativas com menos uso de recursos, energia, água e geração de efluentes (SCHMIDT, 2019). Neste contexto é compreensível a importância de incentivos à inovação e pesquisa neste segmento.

Isto posto, o presente trabalho tem como objetivo geral apresentar pesquisas que vêm sendo estudadas no ramo de transição à uma produção nos processos a úmido de modo mais limpa e sustentável. O modelo referencial desenvolvido nesta pesquisa, se dá ao fato do grande consumo de produtos tóxicos, água e energia ainda largamente utilizado nas indústrias. Em resposta à problemática identificada, a presente pesquisa apresenta, como metodologia da pesquisa, uma revisão bibliográfica referente a alternativas atreladas ao conceito de *Química Verde* que estão crescendo hoje na indústria têxtil.

O trabalho foi dividido em etapas, com o propósito de desenvolver uma abordagem prévia dos modos convencionais de produção têxtil, com aprofundamento ao processo de beneficiamento e seus impactos ambientais. Na sequência, é apresentado a *Química Verde*, e a

inserção de seus conceitos nos processamentos têxteis. Por fim, são descritas algumas medidas e tecnologias sustentáveis, apresentando o grande potencial no quesito de reduzir significativamente danos ambientais, além de seus desafios de inserção.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Compreender os impactos ambientais do beneficiamento têxtil e apresentar alternativas, com modelo referencial, através do conceito de *Química Verde*, compreendendo os potenciais e desafios existentes nesta transição a uma produção mais sustentável, em âmbito industrial.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

- a) Descrever o beneficiamento têxtil e identificar seus impactos ambientais;
- b) Destacar a importância de um modelo de produção sustentável;
- c) Analisar métodos e técnicas sustentáveis de substituição dos processos e produtos atuais;
- d) Apresentar os potenciais e desafios envolvidos na transição à *Química Verde*.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com Santos *et al.* (2012), o ser humano interfere no ambiente com o intuito de garantir sobrevivência e habitar com maior conforto. No entanto, estas interferências são realizadas ignorando os limites da natureza e seus recursos. Com o desenvolvimento tecnológico, os impactos causados pelo ser humano no ambiente, se tornaram ainda maiores. O aceleramento do consumo, dificulta análise crítica de como a produção têxtil funciona. Utilizam-se recursos naturais de modo desenfreado, produtos químicos tóxicos e processos insustentáveis, ocasionando impactos ambientais que podem ser irreversíveis. É estimado que mais de 80% dos impactos ambientais relacionados ao produto são determinados na fase de concepção. Isso demonstra a relevância em evitar que poluições sejam geradas, ao invés de tratá-los posteriormente.

Dentre os muitos processos da produção de um substrato têxtil, os mais agravantes são os chamados beneficiamentos. Bastian (2009, p. 36) e Estender (2015, p. 243) consideram que o tingimento, a estamparia, a desengomagem e as lavagens, as etapas que geram a maior quantidade de efluentes contaminantes de toda a cadeia produtiva. Monteiro (2008) aponta que

a quantidade de água industrial despejada juntamente com sua carga química, proveniente dos banhos dos beneficiamentos são os principais fatores relacionados à questão ambiental, não desprezando o consumo de energia, emissões para a atmosfera, resíduos sólidos e odores.

Em todas as etapas do tratamento dos têxteis é necessária a utilização de diversos produtos químicos além dos corantes e pigmentos. Cerca de oito mil produtos químicos estão aptos e disponíveis para aplicação nas etapas do beneficiamento primário, muitos contendo metais pesados, cancerígenos e tóxicos, os quais levantam sérias preocupações com o meio ambiente, além da segurança com trabalhadores das indústrias têxteis e consumidores finais (ARPUTHARAJ *et al.*, 2016; TELI, 2008; HUSSAIN, 2018, p.807).

Ao final dos processos, as águas residuais estão carregadas com os diversos auxiliares, corantes e produtos químicos utilizados nos tratamentos. Sendo em sua grande maioria não biodegradáveis e não recicláveis, aumentam as cargas de demanda biológica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO) e sólidos totais dissolvidos (TDS) (SAXENA; RAJA; ARPUTHARAJ, 2016).

Isto posto, a *Química Verde*, ramo da Química que buscam recuperar a qualidade do meio ambiente, visa através dos seus 12 principais conceitos, diminuir ou eliminar o uso de substâncias que promovem a poluição. Dentro do setor de beneficiamento, fundamenta-se por causa das diretrizes tecnológicas para o tratamento de efluentes líquidos industriais, produtos químicos não poluidores, redução do consumo de energia e reuso da água. O debate é sobre a importância de se pensar no momento da concepção do produto, maneiras de evitar tamanhos impactos ambientais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

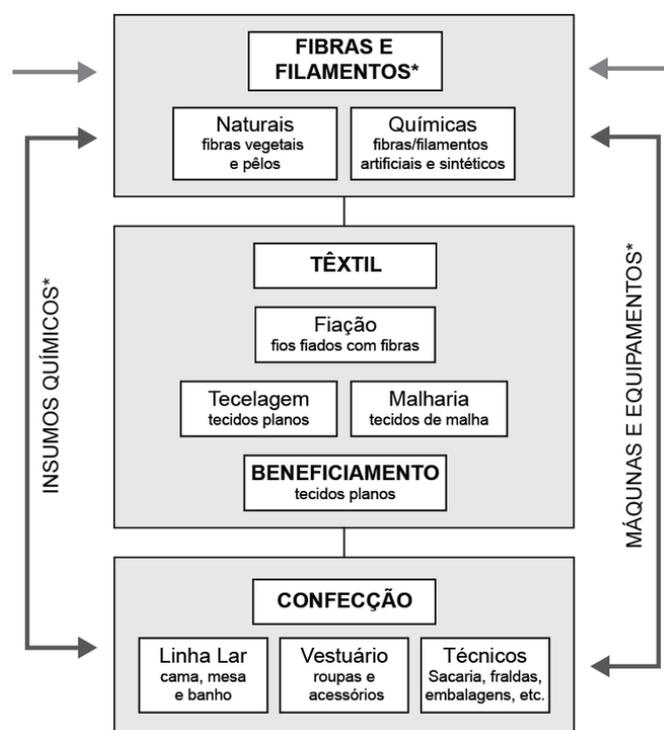
O presente capítulo servirá como base para os estudos acerca dos potenciais e desafios da implementação da chamada *Química Verde* nos processos de beneficiamento têxtil.

### 2.1 PANORAMA DA CADEIA PRODUTIVA TÊXTIL

Cadeia produtiva pode ser compreendida como um conjunto de atividades realizadas do momento da concepção da matéria prima até o produto final, ou seja, uma sequência de atividades industriais que conduzem à sucessiva transformação de bens, em seu estado bruto, ao acabado. Como ressalta Haguenauer (2001), uma cadeia produtiva têxtil pode ser compreendida como um "subconjunto de atividades pertencentes aos macrocomplexos". A Figura 1 representa um exemplo dessa sequência.

O microcomplexo têxtil/vestuário é constituído por uma cadeia de atividades em sequência linear, desde o beneficiamento e fiação de fibras naturais e/ou químicas, passando pela tecelagem, até a confecção final. [...] Apesar desse elo linear entre as etapas da cadeia, cada uma delas pode ser realizada em pequenas ou grandes quantidades, de maneira especializada ou com diferentes graus de integração vertical (HAGUENAUER, 2001, p. 27).

Figura 1 - Demonstração do fluxo da cadeia produtiva têxtil.



Fonte: Adaptado de Macedo (2015).

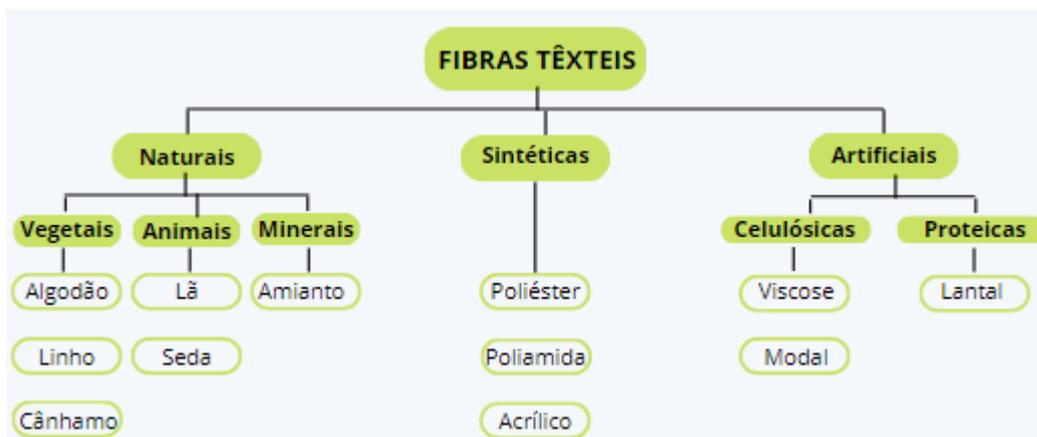
Esse fluxograma demonstra, de forma macro, os processos têxteis, ficando visível a complexidade desta indústria devido a quantidade de setores e variáveis da produção de um substrato têxtil (MODEFICA, 2021). Vale ressaltar que, no que tange à indústria têxtil, existem diferentes tipos de processos, devido à grande variedade de tipos de fibras a serem industrializadas e das características do material têxtil que se deseja produzir. Cada uma dessas etapas possui características próprias, existindo descontinuidade entre elas. Assim, o resultado de cada etapa constitui o insumo principal da seguinte.

Característica marcante da indústria têxtil é a descontinuidade do processo produtivo, e embora as etapas se interliguem, não há necessidade de serem realizadas pela mesma empresa, o que favorece a especialização em determinadas áreas do processo produtivo (SERRA, 2001). Em contrapartida, dificulta, muitas vezes, a rastreabilidade e adequação dos processos em questão de qualidade e sustentabilidade.

No processo produtivo, de acordo com Pezzolo (2007) são considerados os seguintes estágios: produção da matéria prima, fiação, tecelagem, beneficiamento e confecção.

- a) **Matéria prima:** A matéria prima dos substratos têxteis é a fibra, podendo ser de origem química ou natural. Tal origem define grande parte das propriedades que o produto final terá, uma vez que cada uma corresponde a características intrínsecas atreladas a ela.

Figura 2 - Principais fibras têxteis.



Fonte: Adaptado de Bastian (2009).

- b) **Fiação:** Conjunto de operações pelas quais se transforma um conjunto de fibras desordenadas e descontínuas em fios têxteis sob estrutura linear com comprimento amplo.

Tabela 1 - Principais processos da fiação.

Principais Processos	Finalidade básica
<b>Fibras Naturais</b> - abertura - carda - passadeira - reunideira - penteadeira - maçoarqueira - filatório - conicaleira - retorcedeira - vaporizador	Esses processos consistem basicamente em: - remover impurezas da fibra; - separar fibras de menor tamanho; - paralelizar, estirar e torcer as fibras para confeccionar o fio; - unir fios para a formação de fios retorcidos; - enrolar os fios (mudança na forma de acondicionamento); - fixar o fio, por meio de calor.
<b>Fibras Sintéticas / Artificiais</b> - chips - extrusão - bobinagem - estiragem - enrolamento - texturização	Esses processos consistem basicamente em: - elaboração dos fios; - estirar, torcer e unir os fios; - enrolar os fios (mudança na forma de acondicionamento); - fixar o fio, por meio de calor.

Fonte: Bastian (2009).

- c) **Tecelagem:** Desenvolvimento da estrutura do substrato, podendo ser uma malha, na qual obtém-se através de uma configuração de laçada; Tecido plano, a partir do entrelaçamento de fios de trama (transversais) com fios de urdume (longitudinal);

Tabela 2 - Principais processos de Tecelagem / Malharia.

Principais Processos	Finalidade básica
<b>Urdimento</b>	Disponibilizar fios de urdume, provenientes de cones, em rolos de urdume.
<b>Engomagem</b>	Aplicar película de goma (natural ou sintética) nos fios de urdume, para posterior tecimento.
<b>Tecimento (tecido)</b>	Confeccionar tecido plano (teares de pinça, de ar ou de água, etc.).
<b>Tecimento (malha)</b>	Confeccionar tecido de malha utilizando teares circulares ou retilíneos (de cone ou de urdume).

Fonte: Bastian (2009).

- d) **Beneficiamento:** Trata-se das etapas em que um tecido é submetido ao final do processo, a fim de melhorar suas características visuais e de toque. Inclui-se aqui os procedimentos de preparação, tingimento ou estampagem e acabamento, também conhecidos como beneficiamento primário, secundário e terciário respectivamente.

e) **Confecção:** Etapa que conclui a cadeia produtiva têxtil, responsável por transformar tecidos em artigos para o mercado consumidor.

Tabela 3 - Principais processos de Confecção.

Principais Processos	Finalidade básica
<b>Modelagem</b>	O esboço idealizado pelo estilista é preparado em papel ou sistema computadorizado gerando o molde base.
<b>Enfesto</b>	Etapa que aumenta o rendimento do corte do tecido. Este é feito em diversas folhas de tecido (camadas sobrepostas).
<b>Corte</b>	O corte do enfesto é a base da confecção que pode ser feito com faca circular ou com serra vertical.
<b>Costura</b>	Tem a finalidade de unir os diferentes componentes de uma peça de vestuário pela formação de uma costura, utilizando técnicas mecânicas (costura), física (solda ou termofixação), ou química (por meio de resinas).
<b>Acabamento</b>	Envolve o arremate das peças (sistema não automatizado), a revisão para verificação da qualidade da costura, passadoria e lavanderia de peças (*).
<b>Embalagem/ Expedição</b>	Envolve a embalagem da confecção utilizando saco plástico, papel, caixa de papelão, etc.

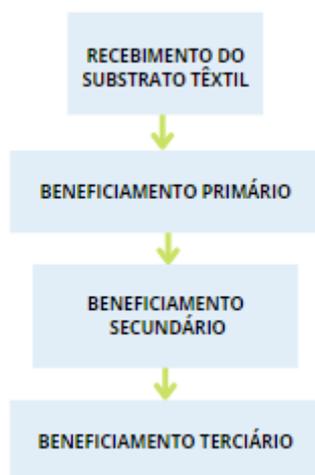
Fonte: Bastian (2009).

Desde a extração da matéria-prima até o acabamento, estes processos reproduzem parte dos impactos ambientais globais, pelo fato de serem grandes consumidores de energia elétrica, água e produtos químicos. Evidente, que este consumo depende da natureza do substrato têxtil, do tipo de máquina e da relação de banho utilizada, dos tipos de processos e tempos utilizados. Entretanto, mesmo que haja diferenças nos tipos e níveis de impactos gerados conforme o tipo de fibra têxtil produzida sempre há impactos ambientais envolvidos. Segundo Bastian (2009), sistemas de fiação exigem elevado consumo de energia elétrica e térmica. No processo de tecimento, é necessário empregar energia elétrica, ar comprimido, óleos lubrificantes e ar interno para o sistema de climatização. Para os processos de produção de fios para a tecelagem plana consomem energia elétrica, ar comprimido e vapor, utilização de água e produtos químicos para a engomagem. Por fim, de forma geral, no beneficiamento dos artigos têxteis poderão ser utilizados vários insumos, como energia elétrica, vapor, água, ar comprimido, óleo térmico, gases, e diversos produtos químicos tóxicos.

## 2.2 BENEFICIAMENTO TÊXTEL E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS

As etapas de beneficiamento têxtil, referem-se a processos mecânicos e químicos aplicados para melhorar as características de uso e atribuir funcionalidades aos fios e fibras (IBRAHIM, 2012; WADJE, 2009). A Figura 3 a seguir ilustra o fluxograma do sequenciamento destes processos.

Figura 3 - Processos de tratamento dos têxteis.



Fonte: Adaptado de CHAIM (2014).

Conforme a Figura 3, são etapas interligadas, que dentro de cada uma delas possui subgrupos, compostos por diferentes tratamentos conforme a aplicação final do substrato têxtil (AGUIAR, *et al.*, 2022). A utilização da água ocorre em todas as etapas demonstradas na figura 3, seja diretamente para lavagem, tingimento, amaciamento, ou, indiretamente para resfriamento, aquecimento ou produção de vapor em caldeiras (Martins, 1997).

Para um maior detalhamento, a seguir são apresentadas as etapas dos processos de beneficiamento primário, secundário e terciário, bem como impactos ambientais associados a estes - válido ressaltar, que cada etapa dessas possuem processos, sequências e auxiliares específicos à cada tipo de fibra em processamento, entretanto, à nível de entendimento, são apresentados os processos mais usuais.

### 2.2.1 Beneficiamento Primário

O beneficiamento primário, também conhecido como etapa preparatória, contempla operações físicas, químicas, bioquímicas e físico-químicas aplicadas ao substrato a fim de remover impurezas como ceras, graxas e óleos oriundos da matéria prima e das etapas anteriores, que podem intervir nos processos subsequentes, além de promover um branqueamento (ARAÚJO, 1984). Como abordado anteriormente, cada substrato e aplicação final define as operações necessárias. A nível de explicação, a seguir, são descritas as etapas de desengomagem, mercerização, purga e alvejamento.

### 2.2.1.1 Desengomagem

A desengomagem é a primeira etapa do beneficiamento primário dos tecidos planos, a qual visa a remoção da goma, aplicada no processo de tecelagem.

Nos processos convencionais, para a remoção da goma, dispõe-se de hidrólise ácida, com o uso de enzimas, ácido sulfúrico/clorídrico ou agentes oxidantes, como persulfato de amônio/potássio, e também, pode-se usar de peróxido de hidrogênio (FURLAN, 2012). Sendo empregado, em principal, produtos inorgânicos neste processo, causam um aumento significativo da demanda química de oxigênio (DQO).

### 2.2.1.2 Mercerização

A mercerização ocorre sob um tratamento alcalino e sob tensão, consiste no tratamento do tecido, usualmente de algodão, a fim de atribuir brilho, resistência, maior afinidade dos corantes ao tecido e maior absorção de água (GEMCI, 2010). Como a Figura 4 apresenta.

Figura 4 - Comparação Algodão sem tratamento / Mercerizado.



Fonte: Adaptado de Filippi (2019).

O princípio da operação consta na impregnação do tecido em solução concentrada de soda cáustica e hidróxido de sódio (NaOH), na presença de umectantes que irão acelerar o processo de penetração na fibra. O excesso de soda cáustica é extraído do substrato por lavagem na própria mercerizadeira e normalmente lançado no efluente, o qual, requer consideráveis adições de ácido para sua neutralização (CETESB, 2009).

A mercerização, portanto, é um processo que tem como resíduo uma carga alcalina muito elevada, incluindo surfactantes e sólidos suspensos, que se não for reaproveitada ou muito bem tratada pode causar, dos mais diversos, danos ambientais (PAZDZIOR, 2019).

### **2.2.1.3 Purga**

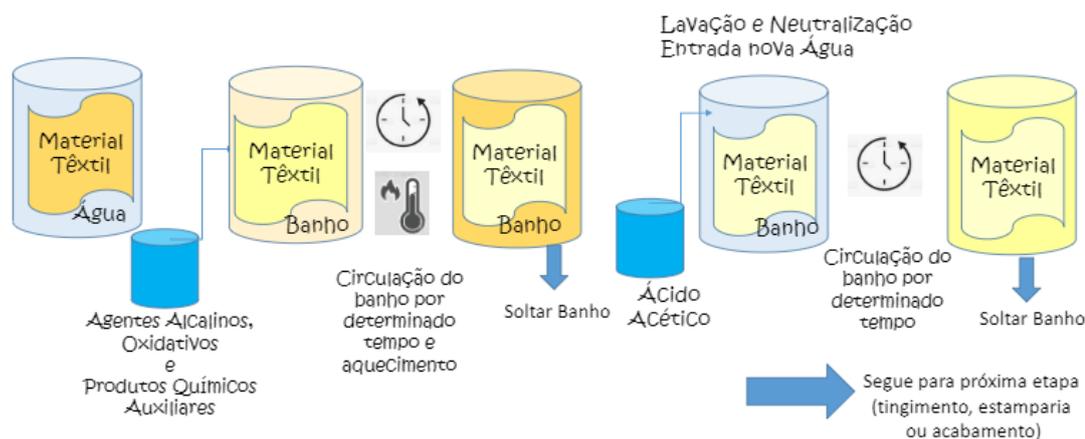
Processo que consiste em retirar qualquer material que possa prejudicar a uniformidade de umectação do tecido nas etapas posteriores. Para isso, utiliza-se uma solução alcalina, geralmente soda cáustica, hidróxido de sódio e um detergente com ação dispersante (BRISTI, 2019). Para este processo, dependendo do grau de sujidade, produtos químicos poderão ser adicionados: agentes oxidantes, agentes redutores e agentes umectantes. São fatores que impactam o ambiente devido a elementos inorgânicos e elementos que causam mudança na tensão superficial da água, podendo causar deficiência de oxigênio em ambientes aquático (MOJSOV, 2012;ROCKY, 2012).

### **2.2.1.4 Alvejamento**

O alvejamento ocorre para remover a coloração amarelada das fibras naturais, e promover aspecto mais branco ao tecido, ideal para aplicação de cores claras ou brancas na etapa de tingimento. Nesse processo, o peróxido de hidrogênio é o principal agente de alvejamento utilizado na indústria têxtil (BABU, 2007). Apesar de ser um ótimo agente branqueador oxidativo, já que é estável, não amarela o tecido durante o tempo de armazenamento e tem baixo custo, suas condições de aplicação requerem alto consumo de energia e podem gerar danos às fibras (GURSOY *et al.*, 2001).

Ao final do procedimento, ainda é necessária uma lavagem intensa para retirada de todo peróxido de hidrogênio. Este método de remoção, ocorre com o auxílio de produtos químicos como bissulfito de sódio ou hidrossulfito, levando a um alto nível de sal nas correntes do processo (IBRAHIM, 2021).

Figura 5 - Esquema representativo Alvejamento por esgotamento.



Fonte: Filippi (2019).

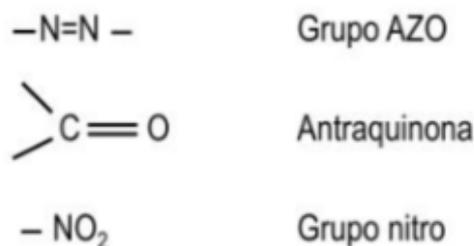
## 2.2.2 Beneficiamento Secundário

O beneficiamento secundário refere-se a etapas em que consiste adicionar coloração, através do uso de corantes (substância orgânicas, em sua maioria solúveis) e pigmentos (compostos insolúveis) que alteram a cor original do substrato. Esta etapa divide-se em duas, tingimento e estamparia, as quais configuram a etapa mais complexa do beneficiamento, pois são utilizados diversos produtos químicos. (AGUIAR *et al.*, 2022).

### 2.2.2.1 Tingimento

O tingimento ocorre através de corantes, os quais, conforme a American Association of Textile Chemists and Colorists explica, são substâncias solúveis orgânicas, que conferem cor a um substrato por absorção seletiva de luz (AATC, 2010). Segundo Kunz *et al.* (2002), a molécula dos corantes é constituída por um grupo cromóforo e um grupo funcional, os cromóforos estão associados à cor do substrato e os grupos funcionais se ligam fisicamente (pontes de hidrogênio ou Forças de Van der Waals), quimicamente (ligações covalentes) ou através de insolubilização do corante no interior da fibra.

Figura 6 - Principais grupos cromóforos.



Fonte: Filippi (2019).

São aplicados nos substratos através de soluções aquosas e designados a fazer fortes ligações com as moléculas poliméricas que formam a fibra têxtil (AGUIAR, *et al.* 2022).

A maior parte dos processos de tingimento atuais, fazem uso de corantes sintéticos, que devido a sua estrutura química podem conter anéis aromáticos, grupos amins, azos, sulfônicos, e íons metálicos em sua constituição, os corantes acabam sendo moléculas de difícil degradação, permanecendo no ambiente por um longo período de tempo (ALMEIDA, 2016). A Tabela 4 demonstra os principais corantes utilizados e de seus poluentes associados classificados em níveis de 1 a 5, com grau de poluição crescente.

Tabela 4 - Principais corantes sintéticos e seus poluentes associados.

<i>Fibra</i>	<i>Classe de Corantes</i>	<i>Tipo de poluição</i>
<i>Algodão e tecido misto</i>	Direto	1. Sal
		3. Corante não fixado (5-30%)
		5. Sais de cobre, agentes catiônicos de fixação
	Reativo	1. Sal, alcalino
		3. Corante não fixado (10-40%)
	Vat	1. Alcalinos, agentes oxidantes
		2. Agentes redutores
	Sulfuroso	1. Alcalinos, agentes oxidantes
		2. Agentes redutores
3. Corante não fixado (10-40%)		
<i>Lã</i>	Cromo	2. Ácidos orgânicos
		5. Sais de metais pesados
	Metalizados	2. Ácidos orgânicos
<i>Lã e fibra sintética</i>	Ácido	2. Ácidos orgânicos
		3. Corante não fixado (5-20%)
<i>Poliéster</i>	Disperso	2. Agentes redutores, ácidos orgânicos
		5. Ligante

1. poluentes inorgânicos relativamente inofensivos; 2. Facilmente biodegradáveis, moderados à alta demanda biológica de oxigênio (DBO); 3. Corantes e polímeros difíceis de degradar; 4. Difíceis de biodegradar, DBO moderada; 5. Inadequadas para o tratamento biológico convencional, DBO insignificante.

Fonte: Traduzido de BLACKBURN (2006).

Os corantes que não se fixam adequadamente as fibras são lançados como efluentes contendo os auxiliares conforme a tabela 4 representa, que conforme Allègre *et al.* (2005) explica, são substâncias não recicláveis e responsáveis pela alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) do efluentes.

A água, em termos de quantidade, é a principal matéria prima utilizada, por se tratar como veículo para os químicos necessários, responsáveis pelo desempenho e pela variedade dos resultados obtidos. Em um artigo publicado por uma organização que promove encontros sobre gestão empresarial e meio ambiente (ENGEMA), Helena Pacca G. Costa pontua (TELLES, 2010):

“Avalia-se que a indústria têxtil consome 15% de toda a água industrial do mundo, perfazendo a ordem de 30 milhões de m<sup>3</sup> ao ano. É utilizada em todas as etapas de produção de tecidos, principalmente nas fases de tinturaria (em que é consumida metade de toda a água deste setor), no pré-tratamento (41%), limpeza e acabamento.”

O tingimento configura, portanto, uma das etapas mais complexas, devido ao alto uso de água, auxiliares e produtos químicos tóxicos, como metais pesados, pigmentos, amônia e sais alcalinos.

### 2.2.2.2 Estamparia

No beneficiamento secundário, também ocorre o processo de estamparia, outro modo de proporcionar cor ao substrato, por meio da impressão de cores e padronagens, utilizando pigmentos ou corantes específicos. A estamparia possui métodos diferentes para promover cor, como: cilindros rotativos, quadros e estamparia digital (AGUIAR *et al.*, 2022).

Figura 7 - Exemplos de Estamparia – Cilindro, Quadro e Digital.



Fonte: Adaptado de Yamane (2008).

A poluição das técnicas de estampar se dá basicamente pela geração de resíduos como restos de pasta de estampar, telas e embalagens como principais poluidores, poluição do ar, pelas emissões atmosféricas, como gases de combustão e vapores de solventes e poluição da

água, na geração de efluentes provenientes da lavagem do material do processo, como telas e rodo, maquinário e piso, além do produto já estampado (FLETCHER. 2008). A Figura 8 demonstra, como exemplo, as entradas e saídas de processos utilizando pigmentos e corantes.

Figura 8 - Exemplo de entradas e saídas de processos de estamparia.



Fonte: Adaptado de Bastian (2009).

Para tais processos, é necessário o uso de um composto químico sintético para a aplicação da maioria dos efeitos especiais disponíveis na indústria têxtil (YOSHIGA, 2004). Alguns deles, dependendo do grau de toxicidade, são nocivos ao meio ambiente e à saúde humana, como por exemplo o plastisol que é uma resina plástica de policloreto de vinila, banido em diversos países do mundo, entretanto, largamente ainda utilizado no Brasil (YOSHIGA; TOFFOLI; WIEBECK, 2004).

### 2.2.3 Beneficiamento Terciário

O acabamento, envolve a última etapa do beneficiamento, de forma a dar ao artigo características físicas e/ou químicas que o enobrecem, tornando-o mais adequado para sua aplicação final requerida. Beltrame (2000) explica que nos acabamentos finais, amaciantes que melhoram o toque, encorpantes que dão um aspecto mais volumoso ao substrato, impermeabilizantes, anti-mofos, bactericidas à base de formol ou outras bases, são aplicados aos substratos dependendo das propriedades finais desejadas.

Cada tratamento necessitará de produtos químicos, auxiliares e processos singulares e configuram operações que têm alto potencial poluente devido aos produtos utilizados (AGUIAR *et al.*, 2022). A Figura 9 demonstra os insumos necessários e os impactos ambientais associados aos principais acabamentos utilizados nos têxteis.

Figura 9 - Entradas e saídas dos principais processos de acabamento têxtil.



Fonte: Adaptado de Bastian (2009).

Compreendida a dimensão, complexidade e os reais custos ambientais das características que orbitam a produção têxtil, o próximo tópico está dedicado à apresentação dos conceitos de *Química Verde*, como potencial à transição para um beneficiamento têxtil mais sustentável.

### 2.3 QUÍMICA VERDE

Nos últimos anos, a poluição ambiental oriunda de processos industriais aumentou o interesse de pesquisadores na descoberta de novos produtos relacionados à saúde, higiene e sustentabilidade para o bem-estar da humanidade (IBRAHIM, 2022)

O conceito de *Química Verde* surgiu na década de 90, quando os químicos Paul Anastas e John Warner, pesquisadores da Environmental Protection Agency (EPA), por meio do programa conhecido como “Rotas sintéticas alternativas para prevenção de poluição”, propuseram a utilização de tecnologias químicas que visam prevenir a contaminação (CASULLO; SOUBIÓN, 2012). A partir deste momento, surge o conceito de *QV*, definida por Anastas e Warner como: "Desenvolvimento de produtos químicos e processos que buscam a

redução ou eliminação do uso e da geração de substâncias perigosas”, conceito aceito pela IUPAC em 1993.

Com isso, muitos dos desafios da *Química Verde* estão pautados em eliminar os processos químicos prejudiciais ao ambiente e substituí-los por outros menos agressivos, sustentáveis, recicláveis e não persistentes; implementar métodos sintéticos para substâncias de alta eficácia com reduzida toxicidade para a saúde humana e para o meio ambiente e ainda, minimizar o uso de energia e usar reagentes preferencialmente na escala catalítica.

As ações propostas por Anastas e Warner condensam os conceitos, objetivos e linhas orientadoras da *QV*, em doze princípios derivados de uma linha básica de orientação. Embora alguns destes princípios pareçam ser pouco mais do que a aplicação do senso comum aos processos químicos, a verdade é que a sua implementação combinada à pesquisas científicas e inovações possuem grande potencial no desenvolvimento de produtos e processos sustentáveis. Apesar da existência de doze princípios, ainda não existe uma definição concreta e amplamente aceita de “síntese verde”. No entanto, há um consenso geral de que isso deve ser alcançado por meio da aplicação de diferentes estratégias e tecnologias. A seguir estão os doze princípios orientadores de Ibrahim (2001) e Ramos (2009):

- **Prevenção:** É mais barato evitar a formação de resíduos tóxicos do que tratá-los depois de serem produzidos;
- **Economia de átomos:** Métodos sintéticos devem ser projetados para maximizar a incorporação de todos os materiais usados no processo no produto final;
- **Síntese Segura:** Deve-se desenvolver metodologias que utilizam e geram substâncias com pouca ou nenhuma toxicidade à saúde humana e ao ambiente;
- **Uso de Solventes e Auxiliares Seguros:** A utilização de substâncias auxiliares como solventes, agentes de purificação e secantes precisa ser evitada ao máximo; quando inevitável a sua utilização, estas substâncias devem ser inócuas ou facilmente reutilizadas;
- **Busca pela Eficiência de Energia:** Os impactos ambientais e econômicos causados pela geração da energia utilizada num processo químico precisam ser considerados. É necessário o desenvolvimento de processos que ocorram à temperatura e pressão ambientes;

- **Uso de Fontes de Matéria-Prima Renováveis:** O uso de biomassa como matéria-prima deve ter prioridade no desenvolvimento de novas tecnologias e processos;
- **Evitar a Formação de Derivados:** Processos que envolvem intermediários com grupos bloqueadores, proteção/desproteção, ou qualquer modificação temporária da molécula por processos físicos e/ou químicos devem ser evitados;
- **Catálise:** O uso de catalisadores (tão seletivos quanto possível) deve ser escolhido em substituição aos reagentes estequiométricos;
- **Produtos Degradáveis:** Os produtos químicos precisam ser projetados para a biocompatibilidade. Após sua utilização não devem permanecer no ambiente, degradando-se em produtos inócuos;
- **Análise em Tempo Real para a Prevenção da Poluição:** A monitorização e controle em tempo real, dentro do processo, deverá ser viabilizado. A possibilidade de formação de substâncias tóxicas deverá ser detectada antes de sua geração;
- **Química Intrinsecamente Segura para a Prevenção de Acidentes:** A escolha das substâncias, bem como sua utilização em um processo químico, deve procurar a minimização do risco de acidentes, como vazamentos, incêndios e explosões. IBRAHIM, 2021; RAMOS, 2009).

Conforme definição, o conceito centra-se no impacto ambiental da química, incluindo abordagens tecnológicas, de produtos e processos, para prevenir a poluição e reduzir o consumo de substâncias perigosas. É uma área extremamente importante devido à importância da química em nosso mundo hoje e às implicações que ela pode mostrar em nosso meio ambiente (HUSSAIN *et al.*, 2021). Apresentado o conceito de *Química Verde*, será apresentado a seguir, seu potencial em relação à aplicação dentro dos processos de beneficiamento têxtil.

## 2.4 QUÍMICA VERDE E O BENEFICIAMENTO TÊXTIL

Com a crescente conscientização sobre problemas ambientais, riscos para a saúde humana e medidas legislativas adequadas, vem obrigando as indústrias têxteis a produzirem materiais sustentáveis. Entre as possíveis abordagens por uma indústria têxtil mais sustentável, a *Química Verde* tem-se demonstrado um conceito com grande potencial, uma vez que se

direciona não apenas às consequências causadas pela química no ambiente, mas antecipa-se e relaciona-se ao desenvolvimento de produtos e a processos sustentáveis mais limpos.

O interesse pela *QV* na indústria têxtil, fundamenta-se por causa das novas diretrizes tecnológicas para o tratamento de efluentes líquidos industriais, produtos químicos não poluidores, redução do consumo de energia e reuso da água.

Ao empregar processos mais eficientes nas principais etapas do processamento úmido, como pré-tratamentos, tingimento e acabamento, a *QV* visa redução de etapas físicas, processos mais eficientes (menos etapas, menos recursos, menos desperdício), redução do consumo de energia e produtos químicos, e redução da produção de resíduos e seus requisitos de disposição. Essas reduções levam à redução de custos com benefícios ambientais em termos de baixa contaminação e menor consumo de matéria-prima, resultando em melhorias sociais, ambientais e econômicas (CHOUDHURY, 2013). A racionalização do uso da água na indústria têxtil é possível ser conseguida com a modernização dos equipamentos e incremento tecnológico nos processos e produtos visando uma menor utilização desse recurso natural tão escasso (TWARDOKUS, 2004). A reavaliação da forma como os produtos são concebidos e utilizados se demonstram fundamentais também para processamentos mais sustentáveis.

Para que a sustentabilidade seja colocada em prática na produção têxtil, é preciso que haja uma correta gestão das substâncias químicas durante a produção. Priorizar o uso de substâncias não tóxicas, promover a reciclagem de materiais e evitar o uso de metais pesados são algumas das atitudes que devem ser tomadas para que haja preservação do meio ambiente (CNI/ABIT, 2012)

Com a fundamentação e aprimoração destes conceitos, a indústria tem grande potencial de alcançar custo benefício a longo prazo, uma melhor performance, menores efluentes, custo mínimo de insumos, uso menor de produtos químicos, processos favoráveis ao meio ambiente, aplicação de maquinário de última geração que pode garantir a reprodutibilidade do produto uma vez aprovado. Com isso, a *Química Verde* pode contribuir com as necessidades humanas e favorecer as transformações atuais, sem prejuízo às novas gerações. Ainda, como ressaltado, usando energia verde renovável produtos químicos, recursos energéticos sustentáveis podem agregar valor a produtos têxteis sustentáveis que satisfaçam as demandas dos consumidores para conforto, segurança, estética e propriedades de desempenho multifuncional (HUSSAIN; IBRAHIM, 2021).

### 3 METODOLOGIA

Para caracterizar o estudo, o entendimento da sua natureza é fundamental para compreender o suporte metodológico utilizado. Diante da exposição de reconhecer características dos modelos tradicionais do beneficiamento têxtil, será necessário revisar em livros e artigos as etapas destes processos, bem como as origens e compreender o porquê dos impactos associados aos mesmos. Para aumentar a familiaridade e classificar conceitos da *Química Verde*, serão necessários explorar os conceitos para compreender a unificação da inserção destas ações à indústria têxtil. Com isso, o presente estudo é previamente definido como *pesquisa descritiva*.

O estudo que busca analisar e propor alternativas mais sustentáveis aplicadas na indústria têxtil, se estrutura sob uma sequência metodológica de processos, métodos e materiais atrelados ao conceito da *QV*. Para isso, em termos de procedimento técnico, a pesquisa será baseada na obtenção de dados a partir da revisão de documentos de diferentes fontes, para organizar os dados de modo coerente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Posto o modelo tradicional do desenvolvimento da etapa do beneficiamento têxtil, foram compreendidas as problemáticas associadas ao alto uso de químicos tóxicos. Sabe-se que a indústria têxtil está entre as que mais polui, entretanto, devido sua consolidação, possui extrema capacidade de aprimoramento. Fazer associação a ecologia, economia e gestão do conhecimento é uma grande estratégia que, segundo Ferreira (2009), permite garantir vantagens competitivas. Assim, diversas medidas preventivas podem ser adotadas, como controle de qualidade da matéria prima, otimização da utilização de produtos químicos e corantes, alterações no processo, modificação no equipamento, manutenção e reutilização de resíduos (CHAMBEL, 2005).

É possível perceber que as indústrias têxteis atuais estão procurando se adequar sustentavelmente, haja vista que além de todas as posturas que visam minimizar danos ao meio ambiente, estão procurando introduzir em seus processos alternativas sustentáveis. Dessa forma, para que todos os processos de minimização dos impactos ambientais sejam alcançados, como explica Santos (2011), é importante definir criteriosamente máquinas, processos e equipamentos, levando em consideração o nível de consumo de energia e a poluição que podem causar.

Plasma, ultra-som, laser, impressão digital a jato de tinta biotecnológica, dióxido de carbono supercrítico e nanotêxteis são algumas das tecnologias ecologicamente corretas inovadoras, que oferecem mais vantagens ambientais ao processamento a úmido usual (IBRAHIM *et al.*, 2021). Neste contexto, torna-se importante o investimento em pesquisas e medidas de implementação e aprimoramento em escala industrial.

Diante disso, o presente capítulo trará, por meio de um *review* a partir de estudos, livros e artigos, potenciais alternativas para a transição da produção tradicional para a *Química Verde* nos processos de beneficiamento dos têxteis. Tendo em vista que são muitos os processos envolvidos, optou-se em abordar, de forma sintética, alguns processos que se demonstraram potenciais, conforme observado nas literaturas.

### 4.1 PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS

O termo “sustentabilidade” é usado para se referir ao grau em que processos ou produtos ajudam a proteger o meio ambiente para as gerações futuras, e em sua definição pela *ONU* significa “Suprir as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações

futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades” (ONU, 1987). Visto a superabundância de produtos químicos, agentes, água, tempo e energia são necessários, o desenvolvimento de processos sustentáveis relacionados à produção são cada vez mais necessários para a indústria têxtil.

Com as crescentes vertentes de produção sustentável, dentre os muitos conceitos, a *Química Verde* possui grande potencial uma vez que se direciona não apenas às consequências causadas pela química no ambiente, mas antecipa-se e relaciona-se ao desenvolvimento de produtos e aos processos sustentáveis mais limpos.

Sendo a *Química Verde* definida como projeto, desenvolvimento e implantação de produtos e processos químicos para reduzir ou eliminar o uso de substâncias nocivas à saúde humana e ao meio ambiente, ao empregá-lo garante redução de etapas físicas, redução do consumo de energia e produtos químicos e redução da produção de resíduos e seus requisitos de disposição. Essas reduções demonstram benefícios ambientais em termos de baixa contaminação e menor consumo de matéria-prima, resultando em melhorias sociais, ambientais e econômicas (CHOUDHURY, 2013).

As metas para a criação de um sistema baseado na *QV* são altas, precisam de otimização constante e conhecimento de novos aspectos. Estes incluem: adoção de tecnologias limpas, redução de falhas no procedimento, utilização de auxiliares menos agressivos, substituição de combustíveis fósseis por energia renovável, reutilização de água, sistema de água em circuito fechado e redução de quantidade e de variedade de produtos aplicados para facilitar o tratamento posterior (SANTOS, 2021; MODEFICA, 2019; FGVCES; REGENERATE, 2020; AGUIAR *et al.*, 2022). Para um beneficiamento têxtil sustentável aplicado à indústria, é necessário que as etapas envolvidas, tenham o intuito de reduzir impactos ecológicos e ainda sim, serem economicamente viáveis em escala industrial, apresentando uma qualidade equiparada ao beneficiamento têxtil convencional. Salienta-se ainda, que para implementação de medidas sustentáveis cabe verificar a viabilidade técnico-econômica e consultar a legislação ambiental vigente. Para qualquer planejamento que visa a alteração nas condições de instalação ou operação da empresa que foi objeto de licença ambiental prévia, como por exemplo, alteração dos processos produtivos, substituição ou alteração de matérias-primas e insumos, mudança de combustível utilizado (CETESB, 2009).

Feita uma análise geral dos potenciais de uma produção sustentável, os próximos tópicos visam aprofundar estes conceitos.

### 4.1.1 Energias alternativas

Os processos como aquecimento, resfriamento, destilação e bombeamento requerem energia elétrica e térmica, usualmente obtidas pela queima de combustível fóssil e matéria orgânica. Isso resulta na liberação de dióxido de carbono na atmosfera, contribuindo no aquecimento global. A *Química Verde* visa desenvolver geração de energia alternativa, como fotovoltaica, hidrogênio, células de combustível e combustíveis de base biológica. Com isso, a eficiência energética pode ser melhorada por reações verdes catalíticas (CHOUDHURY, 2017).

### 4.1.2 Produtos Verdes

Não há uma definição clara do que constitui “produtos químicos verdes”. Entretanto, baseado no conceito de *QV*, é ideal optar por um desenvolvimento de processos e produtos para reduzir ou eliminar substâncias perigosas. Nos últimos anos, o uso de produtos químicos biodegradáveis e não tóxicos está em ascensão no processamento úmido de têxteis como produtos alternativos. Eles são adaptados para melhor biodegradabilidade e para reduzir a toxicidade dos efluentes descartados das unidades de processamento (HOLKAR *et al.*, 2016).

### 4.1.3 Reúso de água

Reutilizar a água de processos é uma medida que vem sendo muito estudada, implantada e tem mostrado resultados promissores. Este processo pode ocorrer usando água de enxágue de uma operação para repor água em uma segunda operação, por exemplo, água de enxágue da etapa de mercerização reutilizada para preparar limpeza. No tingimento convencional, a maioria dos produtos químicos permanecem no banho após o processo e são descartados com o efluente. Neste processo, existe a viabilidade de reutilização do banho dependendo do corante, cor e tom (ETBPP, 1997).

Um exemplo nacional, é a empresa brasileira *Golden Tecnologia*, especializada na área têxtil, que lançou uma tecnologia denominada *Dye Clean*, cujo sistema consiste em tingir fibras naturais com corantes reativos, reaproveitando a água dos banhos. O processo promete reduzir em 80% o consumo de água, em 50% o de produtos químicos e auxiliares, e em 80% o de sal durante o processo (PEREIRA, 2015).

#### 4.1.4 Combinação de processos

Combinar processos resulta em uma otimização do beneficiamento. Para ocorrer, algumas abordagens são sugeridas para atingir este objetivo, como por exemplo, etapas do beneficiamento primário feito de modo combinado ou a combinação do tingimento com acabamento em uma única etapa. São medidas que economizam energia, produtos químicos, água e taxa (NETTLES. 1983;HOU A, *et al.*, 2013).

Para cada etapa são necessárias averiguações da possibilidade de unificação. Entretanto, sua eficácia é comprovada uma vez que otimiza processos, auxiliando na diminuição de produtos, água e energia (ETBPP, 1997).

## 4.2 TECNOLOGIAS MAIS VERDES

Muitas tecnologias vêm avançando e demonstrando grande potencial como alternativas sustentáveis nos processos de beneficiamento têxtil. Para tanto, o presente capítulo apresentará através de um *review*, algumas tecnologias que já demonstram potencial em larga escala, a nível industrial e que contemplam as principais etapas do beneficiamento primário, secundário e terciário.

### 4.2.1 Enzimas no pré tratamento

Nos processamentos têxteis, as aplicações enzimáticas exibem muitos benefícios ambientais valiosos associados às práticas da *Química Verde*, como toxicidade zero, custo-benefício e sustentabilidade, e que têm sido utilizadas em uma ampla gama de processos visando substituir produtos químicos. O uso de enzimas no processamento baseado na indústria têxtil não é novo, mas cada vez mais, as comunidades científicas mostram grande interesse em tecnologias de processamento têxtil baseadas em tratamentos enzimáticos para desenvolver alternativas verdes para as restrições ambientais e econômicas existentes.

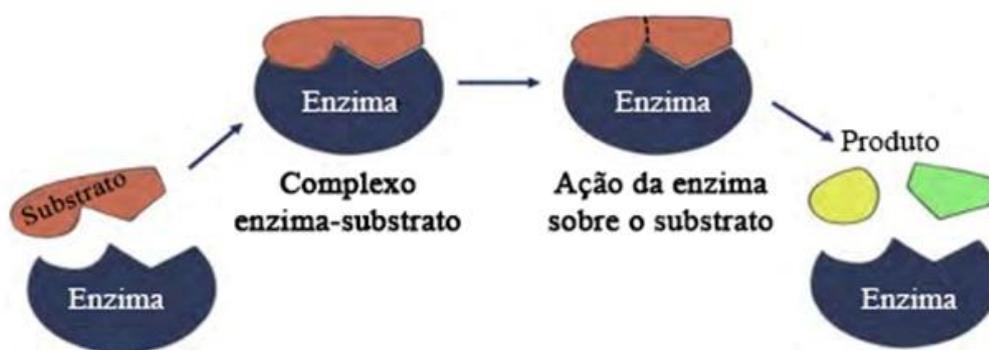
A ação das enzimas se concentra em reduzir a energia de ativação para que a reação aconteça mais rapidamente. Dado isto, podem ser utilizadas como biocatalisadores seguros e ecológicos, usados na preparação e acabamento de materiais têxteis, que aceleram a reação química, de forma a reduzir o consumo de água e energia (IBRAHIM, 2021).

A grande popularidade dos tratamentos enzimáticos tende a uma série de propriedades consideráveis, incluindo não toxicidade, ecologicamente correta, biodegradabilidade,

sustentabilidade, baixo consumo de energia devido a sua capacidade de acelerar as reações, seletividade, aplicabilidade e reutilização e menor formação de subprodutos (RASHESH *et al.*, 2001; MOJSOV, 2011; IBRAHIM, 2021; CAVACO-PAULO *et al.*, 2003).

A atividade enzimática pode ser melhor compreendida pela hipótese proposta pelo químico alemão Emil Fischer, em 1907, conhecida como mecanismo “chave-fechadura” (Figura 10). Esse mecanismo demonstra que apenas o substrato reativo atua como uma chave que se encaixa na trava enzimática (sítio ativo).

Figura 10 - Mecanismo chave-fechadura das enzimas.



Fonte: Traduzido de Ibrahim, *et al.* (2021).

Ainda assim, cada tipo de enzima irá reagir conforme o tipo de reação que catalisam, visto serem muito específicas. A classificação das enzimas, de acordo com a União Internacional de Bioquímica e Biologia Molecular (NC-IUBMB), é definida como:

- Oxirredutases: catalisam reações de oxidação/redução.
- Transferases: transferem um grupo funcional.
- Hidrolases: catalisam a hidrólise de várias ligações.
- Liasas: clivam várias ligações por outros meios além da hidrólise e oxidação.
- Isomerases: catalisam mudanças de isomerização dentro de uma única molécula.
- Ligases: unem duas moléculas com ligações covalentes. (MOJSOV, 2011).

Conforme apresentado, cada tipo de reação demanda uma enzima específica, portanto, para cada função específica existe uma determinada enzima para realizar a tarefa.

#### 4.2.1.1 Aplicações

Atualmente, existem várias vias de processamento nas quais os tratamentos enzimáticos fazem sentido econômico por conservação de energia, produtos químicos e água com qualidade

aprimorada. Até o momento, muitas investigações foram realizadas para diversas aplicações das enzimas nos processos têxteis, entretanto, possuem uma maior adesão nos processamento de preparação dos têxteis (beneficiamento primário). As celulases são comumente utilizadas para bio-limpeza, amaciamento. Já as amilases, são utilizadas em processos de desengomagem. Além disso, lipases, catalases, xilanases, pectinases, proteases, etc., também estão sendo utilizadas para biolimpeza, biopolimento, biobranqueamento e desbotamento de substratos denim (SINGH S, 2016).

Enzimas hidrolisadoras de amido, particularmente  $\alpha$ -amilases, são frequentemente usadas na desengomagem de tecidos de algodão com amidos não solúveis ou seus derivados devido à sua rapidez, seletividade, especificidade e benefícios ambientais. Demonstrando ótimos resultados no processo de desengomagem, sem deformar o substrato têxtil e com baixo uso de energia. Cavaco-Paulo, (2003) ressalta que o processo pode ser realizado a baixas temperaturas e sob um pH ótimo entre 5,5 - 6,25 (CAVACO-PAULO; GÜBITZ, 2003).

Furlan (2012), em seu trabalho de pesquisa e aplicação, utilizou para o teste de desengomagem enzimática a  $\alpha$ -amilase, obtida a partir do *Bacillus licheniformis*. Esta enzima foi aplicada no processo com pH de 5,0 – 7,0, temperatura entre 50 -110°C, e ao final, o autor concluiu que o processo enzimático é tão eficiente quanto o processo convencional (FURLAN, 2012).

A junção de mais de uma tecnologia também é largamente utilizada nos processamentos mais sustentáveis. Segundo alguns estudos realizados, o uso de ondas ultrassônicas no processo de desengomagem enzimática melhora a eficiência das enzimas dado que eles atuam como estabilizadores, contribuindo para a diminuição da dosagem da enzima tornando possível o uso dela em condições moderadas de processo (CHAND *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2012).

A biolimpeza do algodão com enzimas oferece maior flexibilidade devido à sua atividade em uma faixa muito mais ampla de pH e em temperaturas mais baixas. A lavagem enzimática promove a interrupção e remoção eficiente de impurezas não celulósicas sem afetar negativamente o tecido ou o meio ambiente. Em geral, a celulase e pectinase são combinadas neste processo (MARROQUES, 2020). As pectinases são as enzimas de biolimpeza mais eficazes, presumivelmente porque a degradação e a eliminação efetiva das pectinas tornam as ceras soltas mais fáceis de serem removidas em condições apropriadas, melhorando assim a absorção do tecido de algodão e evitando que as fibras de algodão se deteriore. Li e Hardin (1997) descreveram que o uso sinérgico da mistura de pectinase e celulase na lavagem do algodão dá origem a uma lavagem mais eficaz em termos de velocidade e uniformidade do tratamento.

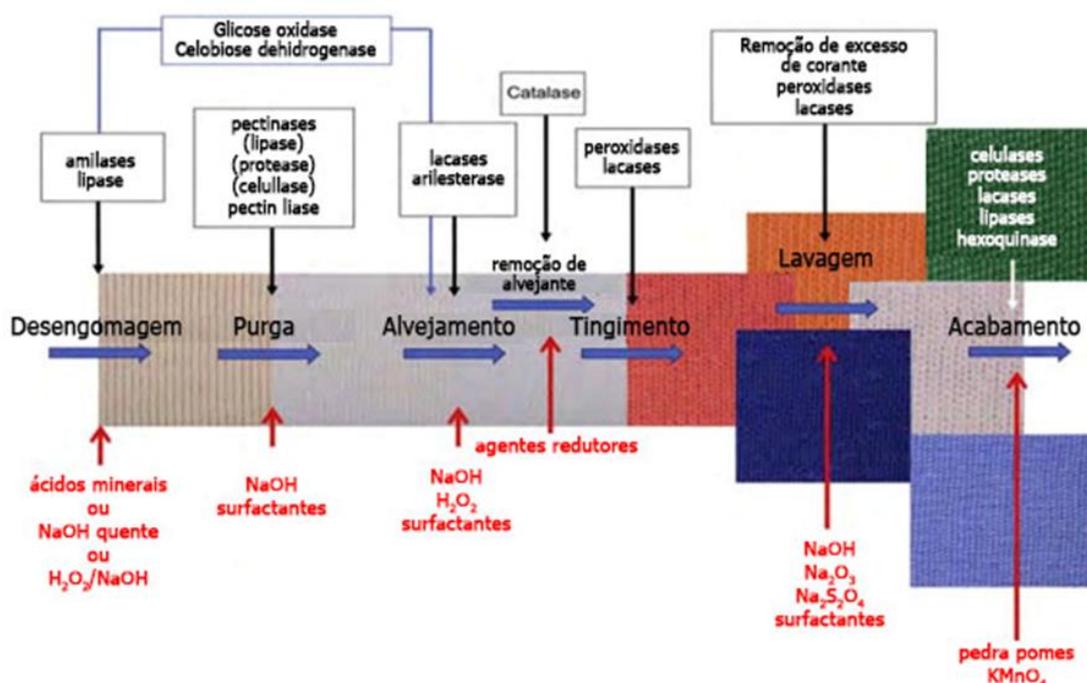
Uma alternativa ao processo usual de alvejamento, é a utilização da catalase. Suas condições de atuação são pH neutro e temperatura entre 20-50°C (DOSHI; SHELKE, 2001). Em um experimento realizado por Amorim *et al.* (2002), foi utilizado uma catalase comercial, cujas condições de aplicação eram pH 5 e temperatura 55°C. Como resultado, o ensaio mostrou um clareamento satisfatório do tecido e uma diminuição de etapas de lavagem e volume de efluente.

Tzanov *et al.* (2003) relataram pela primeira vez o aumento do efeito clareador obtido em tecidos de algodão utilizando lacases em baixas concentrações. Além disso, o curto tempo de pré-tratamento enzimático suficiente para aumentar a brancura do tecido torna este bioprocessado adequado para operações contínuas.

Basto *et al.* (2006) propuseram um tratamento de ultrassom lacase combinado para branqueamento de algodão. Eles descobriram que o fornecimento de baixa energia de ultrassom (7W) melhorou a eficiência do clareamento da lacase em tecidos de algodão. Segundo eles, comparado com os métodos tradicionais de limpeza, o processo enzimático resulta em águas residuais mais limpas, consumo de água reduzido e uma redução de energia e tempo.

Uma revisão geral pode ser demonstrada referente aos auxiliares utilizados usualmente nos processos a úmido, e as enzimas que podem ser utilizadas como alternativa sustentável, conforme a Figura 11 demonstra.

Figura 11 - Processos convencionais *versus* biotratamento.



Fonte: Traduzido de Ibrahim, *et al.* (2021).

Fica evidente que, como no processamento têxtil, as enzimas podem ser usadas com sucesso em processos preparatórios, como desengomagem, lavagem e branqueamento. Estes processos enzimáticos dão resultados semelhantes aos dos métodos convencionais. Através destes processos enzimáticos podemos reduzir o consumo de água, energia elétrica, poluição e taxa.

#### 4.2.1.2 Desafios

Embora vários benefícios tenham sido considerados no processamento de materiais têxteis usando tratamentos enzimáticos, os obstáculos mais importantes para regularizar o uso comercial de processos enzimáticos são o custo relativamente alto com conhecimento insuficiente sobre aplicabilidade (SHAHID, *et al.*, 2016; WANG, *et al.*, 2012).

Além disso, a estabilidade térmica das enzimas é outra preocupação associada à aplicabilidade limitada aos substratos têxteis e a melhoria ainda não foi resolvida alguns fatores determinantes são de acordo com Ibrahim:

**Temperatura:** Determina a velocidade em que a reação química acontecerá.

**pH:** Responsável por regular a atividade da enzima.

**Tempo:** Determina o tanto de produtos que serão produzidos a partir do contato da enzima com o substrato.

**Taxa:** A influência de um fator na taxa da reação é principalmente devido ao seu efeito no sítio ativo.

**Concentração da enzima e do substrato:** Faz a regulação da velocidade da reação através da quantidade de elementos (IBRAHIM, 2021).

A busca por enzimas com melhor atividade e estabilidade em altas temperaturas e sob condições alcalinas está crescendo dia a dia. Esforços contínuos estão sendo feitos para encontrar novas fontes microbianas para enzimas de biolimpeza com melhores faixas de atividade sob diferentes condições de temperatura e pH.

Embora esses avanços tecnológicos sejam muito promissores, é necessária uma verificação de desempenho de custo para determinar sua aceitação industrial, bem como estudo voltado para a reciclagem da enzima após processo. Se seu custo puder ser gerenciado, e houver maior incentivo a pesquisa, as enzimas podem ser usadas de maneira muito maior para aplicações de processamento têxtil.

#### 4.2.2 Plasma

O plasma é conhecido como o 4º estado da matéria, após a transição de estado sólido, líquido e gasoso, essa definição foi constatada por Langmuir I. em 1926 (IBRAHIM, 2021). É definido como um gás ionizado com igual proporção de cargas positivas e negativas sob condições extremas de pressão e temperatura. Os plasmas iônicos são criados numa variedade de gases (He, Ar, Ne, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) por meio de corrente elétrica direta (aplicada entre eletrodos), rádio frequência, ou fontes de energia de micro-ondas e geralmente são formados em câmaras à baixa pressão (GIORDANO, 2016).

Sob esses efeitos, a superfície do tecido pode ser modificada devido a mudança dependendo da natureza da matéria gasosa, tipo de tecido, corrente, pressão e temperatura. Tais alterações, ao contrário dos processos úmidos convencionais, que penetram profundamente nas fibras, reagem apenas com a superfície do tecido, o que não afeta a estrutura interna das fibras. A tecnologia de plasma modifica a estrutura química, bem como as propriedades da superfície dos materiais têxteis, deposita materiais químicos para agregar funcionalidade, ou remover substâncias dos materiais têxteis para melhor aplicabilidade (YUSUF, 2021).

Decorrente das características do plasma, esta técnica é conhecida como uma abordagem de tratamento de superfície ambientalmente amigável com a capacidade de melhorar a adesão, a umectação, a afinidade de tingimento e a reatividade das fibras têxteis (EL-NAGAR *et al.* 2006, KALE *et al.* 2011; KAN *et al.* 2016; MORENT *et al.* 2008). Os tópicos a seguir demonstram as vantagens da tecnologia de plasma em comparação com os métodos convencionais na indústria têxtil como destacam Serniabat (2018), Yusuf (2022) e Nidhi (2016):

- Possibilidade de aplicação na maioria dos materiais têxteis para tratamento de superfície;
- Otimização das propriedades superficiais dos materiais têxteis sem qualquer alternância das propriedades inerentes aos materiais têxteis;
- Trata-se de um processo de tratamento têxtil a seco, sem gastos com tratamento de efluentes;
- É um processo verde sem geração de produtos químicos, solventes ou substâncias nocivas. O consumo de produtos químicos é muito baixo devido ao processo físico;
- Curto período de tempo e baixa temperatura.

Com isso, o plasma, cujas principais vantagens é um processo seco e muito eficiente em termos energéticos e limpo, geralmente traz processo mais sustentáveis, com sua menor quantidade de produtos químicos necessários do que o processamento úmido, consumo mais

eficiente de produtos químicos, valores mais baixos de toxicidade dos efluentes e também pode proporcionar a redução do tempo de processamento úmido, reduzindo a temperatura de processamento úmido e, portanto, alta economia de energia. (RADETIC, 2007) (Tabela 5).

Tabela 5 - Tratamentos com plasma comparado ao método convencional.

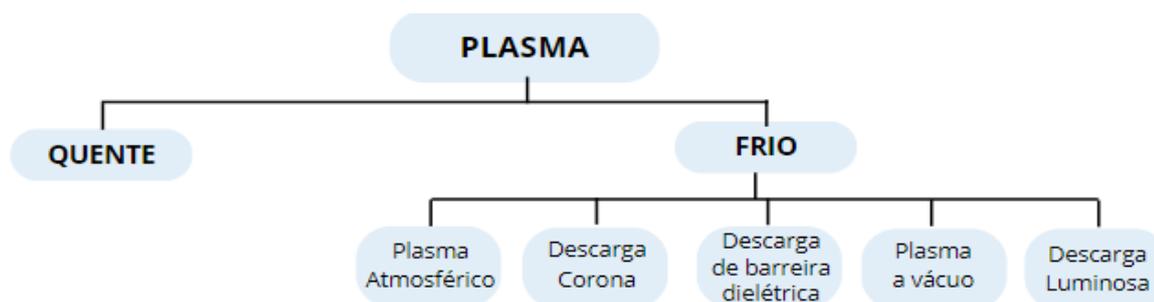
MÉTODO CONVENCIONAL	TECNOLOGIA PLASMA
Método a úmido.	Sem necessidade de água para aplicação do plasma.
Grande uso de energia e de produtos químicos.	Baixa energia e consumo de produtos químicos.
Longo de período de tratamento.	Curta taxa de duração.
Potencial de afetar estrutura do material.	Plasma não afeta a estrutura do material.
Método mais simples.	Método mais complexo.
Uso de energia térmica.	Uso de energia elétrica.

Fonte: Traduzido e adaptado de EYUPOGLU *et al.* (2018).

#### 4.2.2.1 Aplicações

Basicamente, o tratamento por plasma pode ser categorizado (dependendo do estado térmico do gás ionizado) em dois grupos, plasma a frio e a quente. Na indústria têxtil, os plasmas a frio, com temperatura inferior a 100°C são mais adequados e utilizados por não causarem danos aos substratos. (GARBASSI (1994). Os métodos de aplicação através do plasma são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Métodos de aplicação do plasma.



Fonte: Traduzido e adaptado de EYUPOGLU *et al.* (2018).

Dadas suas propriedades, a tecnologia de plasma tem sido usada para induzir melhorias nas propriedades da superfície e do volume de materiais têxteis, resultando em melhorias em produtos têxteis, sintéticos ou naturais, e que variam de tecidos convencionais a compósitos avançados. Pode melhorar a funcionalidade de materiais têxteis.

O pré tratamento, através da desengomagem pode ser satisfatoriamente realizada com o tratamento a plasma, através da remoção do amido, resultando num aumento da hidrofiliabilidade e capacidade de absorção, ganhando propriedades hidrofóbicas, desenvolvendo propriedades de adesão e aumentando a capacidade de tingimento (CAI *et al.*, 2003). Este processo promove a redução do tempo, minimizando a concentração de sabão e diminuindo a temperatura de lavagem na desengomagem da seda (SAMANTA *et al.*, 2015; MUTHU SS, 2016).

No branqueamento, diversos estudos foram desenvolvidos no tratamento de plasma com ar atmosférico e argônio, os resultados mostraram que a resistência ao *pilling*, térmica, permeabilidade ao vapor de água e o coeficiente de atrito superficial aumentaram (KARAHAN, 2009).

Kan *et al.* investigaram a tingibilidade da lã com *CI Acid Red 183* após tratamento com plasmas de oxigênio e nitrogênio. Os resultados mostraram que o tratamento com plasma aumentou a taxa de tingimento, sem afetar o equilíbrio. A afinidade padrão foi aumentada e o calor de tingimento foi diminuído. Os fatores que contribuem para esse aumento na absorção de corantes pode ser a mudança da área da superfície do tecido por unidade de volume devido à erosão superficial e às mudanças químicas na superfície da fibra. (SHAH J; SHAH S, 2013)

O processo de beneficiamento terciário também pode ser alcançado com o tratamento do plasma. Ao contrário dos processos de acabamento úmido, que penetram profundamente nas fibras, o tratamento com plasma é restrito à reação de superfície e limitada a uma camada superficial da fibra. Devido a estas várias funcionalidades e propriedades pode ser transmitidas às fibras naturais e sintéticas, bem como tecidos não tecidos, sem ter qualquer efeito adverso em suas estruturas internas. Isso leva à produção de vários tipos de têxteis funcionais. Várias aplicações de acabamento de plasma em têxteis são apresentadas a seguir:

- Acabamento Hidrofóbico
- Anti estático
- Proteção UV
- Antibactericida
- Retardante de chama (NA). (NAEBE, *et al* 2020; IBRAHIM, *et al* 2020; CHINTA S, *et al* 2012; SHAH *et al.*, 2013).

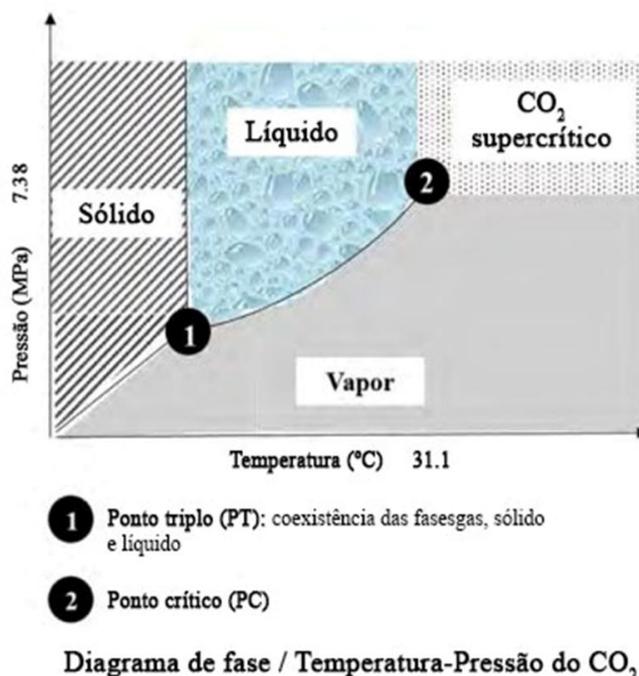
### 4.2.2.2 Desafios

Apesar de ser uma tecnologia cara inicialmente, oferece maior taxa e menor custo de produção, melhores produtos e mais importante, acabamentos em tecidos que são difíceis de obter por outra tecnologia ou não obtido. E acima de tudo isso, a tecnologia de plasma oferece a liberdade do ambiente problemas que as tecnologias tradicionais apresentam.

### 4.2.3 Fluido Supercrítico

O tingimento com fluido supercrítico é uma tecnologia promissora que foi proposta pela primeira vez na década de 1980 para superar a alta demanda de energia, consumo de água e geração de efluente tóxico do tingimento têxtil convencional (BANCHERO, 2019). Esta tecnologia é definida como fluidos altamente comprimidos que resultam em propriedades de gases e líquidos. Acima da temperatura e pressão críticas, esta substância pode coexistir tanto na forma de gases quanto na forma líquida (AVINC, 2017) (Figura 13). Para o processamento úmido de têxteis, este processo envolve gases substituindo a água como meio de solvatação.

Figura 13 - Funcionamento do Fluido Supercrítico.



Fonte: Traduzido e adaptado de Haji, Bahtiyari (2021)

Em particular, o dióxido de carbono supercrítico (SC-CO<sub>2</sub>) tem sido um dos solventes mais úteis e ecologicamente corretos usados nos processos de fabricação hoje e, portanto, os processos têxteis comerciais que usam SC-CO<sub>2</sub> têm muitas vantagens sobre os processos aquosos tradicionais (HENDRIX *et al* 2001). Na indústria têxtil, é largamente utilizado através de fluido supercrítico devido sua pressão e temperatura crítica ser facilmente obtida em comparação com outras substâncias, além disso, é abundantemente disponível, inerte, não inflamável, não tóxico e não explosivo (CHANKRABORTY, 2010).

Esta tecnologia tem alto potencial para superar muitos problemas ambientais e técnicos e para ser aplicada em muitos processos têxteis comerciais, como preparação de fios, coloração e acabamento. O SC-CO<sub>2</sub> pode oferecer um ambiente potencialmente único para o transporte de produtos químicos dentro ou fora de um substrato polimérico devido às suas propriedades termofísicas e de transporte.

Sua maior aplicação vem sendo na área de tingimento, principalmente de fibras sintéticas, mas pode ser estendida para melhorar o desempenho dos têxteis, seja por pré-tratamento ou por conferir funcionalidade, devido às suas propriedades.

O SC-CO<sub>2</sub> não apenas economiza água, mas também melhora a eficiência devido aos ciclos mais curtos, redução do consumo de energia, minimização do uso de produtos químicos e auxiliares e redução consideravelmente das emissões atmosféricas (MONTERO *et al.*, 2000).

#### **4.2.3.1 Aplicações**

A baixa resistência à transferência de massa e as altas taxas de difusão observadas no SC-CO<sub>2</sub> auxiliam na penetração do corante nas fibras causando uma redução nos tempos de tingimento. Como o processo de tingimento é sem água, a etapa de secagem é eliminada, economizando energia e tempo. A baixa viscosidade do SC-CO<sub>2</sub> e as características de penetração bastante alta das moléculas dissolvidas são fatores particularmente significativos no processo de tingimento. O SC-CO<sub>2</sub> deve dissolver facilmente os corantes em estado sólido e deve se difundir até nos poros menores sem a necessidade de processos de convecção rigorosos (CHANG *et al.* 1996, GEBERT *et al.* 1994, PAJNIK *et al.* 2017, VANDER KRAAN *et al.* 2003, WANG *et al.* 2019, ZAIDY *et al.* 2019). Uma comparação do tingimento convencional utilizando água e o processo de tingimento com SC-CO<sub>2</sub> é fornecida na Tabela 6:

Tabela 6 - Comparação do método tradicional de tingimento ao tratamento com Dióxido de carbono supercrítico.

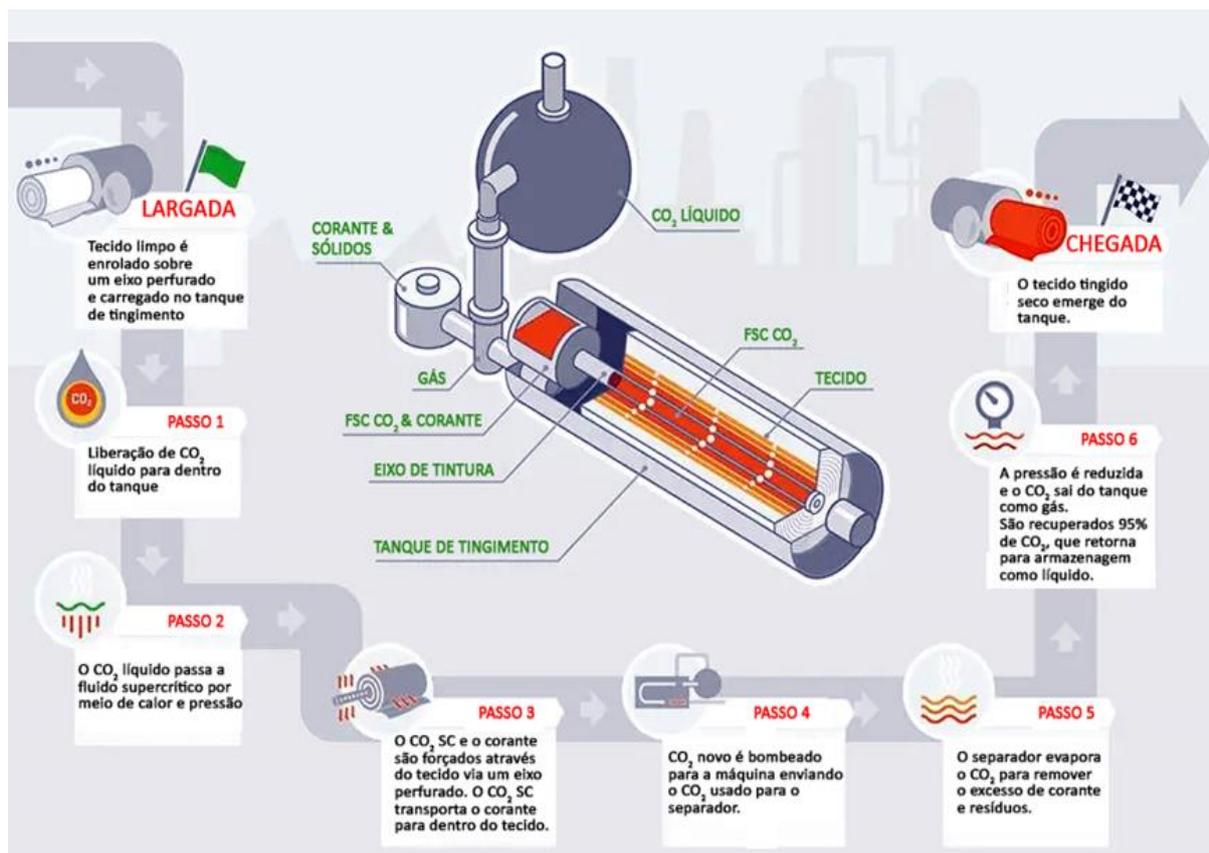
MÉTODO CONVENCIONAL DE TINGIMENTO	TINGIMENTO COM $scCO_2$
Alto índice de água	Sem uso de água
Grandes quantidades de sal e álcalis	Sem aditivos
Hidrólise da molécula de corante	Não ocorre
Tratamento de efluente custoso	Não gera efluente

Fonte: Traduzido e adaptado de Ibrahim (2021)

O tingimento de fibras sintéticas demonstra sucesso devido ao alto rendimento de cor e solidez com corantes dispersos. O seu avanço baseia-se no fato de os corantes dispersos, que são os comercialmente utilizados no tingimento tradicional em água deste têxtil, apresentarem maior solubilidade em SC-CO<sub>2</sub> do que em água. Devido a esses fatores, tem sido utilizado para o tingimento de poliamidas e poliésteres, empregando corantes dispersos como abordagem livre de efluentes.

A *DyeCoo* hoje é uma das únicas empresas que conseguiu expandir a tecnologia de processamento têxtil em escala industrial comprovada. A empresa utiliza tecnologia patenteada e comprovada industrialmente. A tecnologia usa CO<sub>2</sub> recuperado como meio de tingimento em um processo de circuito fechado. O seu processo é apresentado na Figura 14 a seguir.

**Figura 14** - Processo de tingimento *DyeCoo* com Dióxido de carbono superaquecido.



Fonte: Traduzido de Nike ColorDry Technology Infographic

Segundo a empresa, com essa tecnologia, conseguem alcançar 98% de absorção, obtendo um índice baixo de desperdício. Sem produtos químicos, nem água, não possuem efluentes. O SC- $\text{CO}_2$  do processo é todo recuperado de processos industriais existentes, reciclando 95% dele em um sistema de circuito fechado.

#### 4.2.3.2 Desafios

Os processos industriais da humanidade geraram muito dióxido de carbono, causando distúrbios na biosfera. No entanto, esta revisão mostra um outro lado do dióxido de carbono que, ironicamente, é benéfico para o meio ambiente. A tecnologia do fluido supercrítico, especialmente o SC- $\text{CO}_2$ , demonstrou substituir o uso de solventes orgânicos perigosos, o que significa que também é energeticamente eficiente. Além disso, a utilização de SC- $\text{CO}_2$  como meio de tingimento na indústria têxtil apresenta-se como uma excelente alternativa para eliminar a água, que atualmente vem causando um problema de poluição mundial.

Entretanto, a comercialização desta tecnologia ainda tenta superar o alto custo dos produtos finais em relação ao tingimento convencional.

Além deste fator, enquanto o SC-CO<sub>2</sub> é adequado para tingir tecidos sintéticos, fibras naturais como algodão, lã e seda só podem ser tingidas com extrema dificuldade, isso devido ao fato de que fibras hidrofílicas são mais difíceis de tingir usando esta técnica com propriedades de alta solidez e alta cor. Com isso, as pesquisas atuais sobre SC-CO<sub>2</sub> vem sendo focadas na otimização do tingimento de tecidos naturais, especialmente o algodão.

## 5 DISCUSSÃO GERAL

O presente trabalho aborda os impactos ambientais causados pelo beneficiamento convencional e apresenta algumas alternativas, desde relativamente simples como substituição de produtos químicos e otimização de processos, até grandes tecnologias como o dióxido de carbono supercrítico e plasma. Por meio da pesquisa foi possível constatar algumas considerações acerca dos potenciais e desafios à esta transição, que serão apresentadas e discutidas nos próximos tópicos.

### 5.1 BARREIRAS À TRANSIÇÃO

Com o desenvolvimento deste trabalho ficaram evidentes alguns fatores que dificultam a inserção de novas tecnologias, dos quais podem-se citar, barreiras como recursos financeiros, e readaptação em um setor tão consolidado.

Como visto previamente, a indústria têxtil confere uma rede produtiva pulverizada e pouco fortalecida. Algumas citações confirmam este fato que dificulta muito na transição para uma produção mais limpa.

Em grande parte dos casos, não há controle sobre resíduos da produção, uso de água e de químicos, muito menos qualquer possibilidade de se falar em logística reversa ou redesenho de modelo de negócio. (MODEFICA, 2020).

Fernando Pimentel, Presidente da ABIT, também compartilha este pensamento, ao dizer que, os problemas são compartilhados mas as soluções não (COLERATO, 2019). Ele acredita que um desenvolvimento sustentável depende de uma grande conexão com todos os elos da rede produtiva, ainda afirma que “[...] A visão de sustentabilidade tem que ser uma visão sistêmica. Não é só um elo, são todos os elos trabalhando juntos para que as estratégias de atuação convirjam e se materializem” (COLERATO, 2019). Estes são pensamentos que afirmam como a transição para processamentos mais limpos dependem de uma união, troca de informações, fortalecimento e reconhecimento de práticas sustentáveis.

Uma entrevista feita no artigo “Processos sustentáveis e conhecimento sobre *Química Verde* em pequenas empresas do setor de beneficiamento têxtil” demonstrou como as empresas possuem receio em gastar com mudanças, e que têm mais medo da fiscalização e de altos gastos (RODRIGUES, *et al.* 2011). Ficando claro ainda, a necessidade de pulverizar e alertar os altos impactos ambientais que o modo de produção atual causa ao nosso planeta.

Poliakoff e Licence (2007) analisam e elencam seis principais classes de barreiras para a implementação da *Química Verde*, que são:

- 1) Econômico e financeiro:** Ocasionalmente a implementação de processos atrelados a *QV* é mais cara que as rotas convencionais.
- 2) Regulatório:** Falta de harmonização global sobre regulamentação e política ambiental; financiamento insuficiente para pesquisa e incentivos regulatórios para alternativas mais verdes.
- 3) Técnico:** Indisponibilidade de reações substitutas e solventes adequados; indisponibilidade de químicos e engenheiros treinados; pouco conhecimento sobre produtos e processos verdes e não compartilhamento de informações relevantes entre as indústrias.
- 4) Organizacional:** Falta de suporte em nível executivo ou técnico e falta de entendimento em vendas e marketing.
- 5) Cultural:** Pouca conscientização e concepção errada sobre eficiência e custo das reações verdes entre consumidores e público em geral.
- 6) Definição e métricas:** Orientação deficiente sobre as melhores práticas e ensino suficiente sobre química sustentável; dificuldade em medir e em conduzir otimização multidimensional (POLIAKOFF; LICENCE, 2007).

Entende-se que muitos desafios ainda estão presentes nesta transição, como fonte de matéria prima renovável, catalisadores ecologicamente corretos e processos de eficiência máxima. Fica claro portanto, que com dificuldades como essas, levando em consideração a corrida pela busca por um planeta mais limpo, o incentivo torna-se urgente (PARTHA, 2021).

## 5.2 FORTALECIMENTO À TRANSIÇÕES

É interessante analisar que medidas como debates, valorização à pesquisa, incentivos fiscais, tende a tornar cada vez mais acessível e fácil essa transição. Mecanismos como normas, regulamentos técnicos e medidas, certificações, estudos de impactos, marcos regulatórios, entre outros, vem evoluindo e passando a ser cada vez mais percebidos e geridos como importantes instrumentos de desenvolvimento e de diferencial no mercado. Atualmente estas medidas configuram-se como ferramentas de competitividade e de participação no cenário global.

Com trabalhos dos diversos elos da cadeia produtiva, juntamente com autoridades, universidades, centros de pesquisa, sindicatos, organizações não governamentais e institutos, o Brasil tem grande potencial para se tornar um modelo de inovação e sustentabilidade na indústria têxtil e no mundo. Desenvolver um projeto por conta própria é demorado e exige altos investimentos em mão de obra e equipamentos. Em virtude disto, há o debate acerca da importância da integração entre empresas e universidades para inovação e qualificação. A chave para uma aproximação entre instituições de ensino e empresas é o compartilhamento de informações já que universidades são o ambiente propício para desenvolver novos produtos/

processos e buscar a melhor forma de viabilizá-los tanto economicamente quanto nos aspectos socioambientais. Com a parceria, a empresa aproveita as instalações da universidade e o trabalho dos estudantes para desenvolver projetos de inovação e sustentabilidade. Para a instituição, a grande vantagem é conseguir verba para patrocinar suas pesquisas e seus pesquisadores, além de divulgar o nome da universidade (ABIT, 2012).

Um debate aberto acerca dos impactos gerados pela indústria também demonstra extrema importância. Com o passar do tempo, projetos como *Fashion Revolution*, *Textile Exchange*, *Modifica* e *Fundação Ellen MacArthur* vem demonstrando-se fundamentais para uma disseminação e debate dos impactos ambientais. São organizações comprometidas em publicar documentos com dados acerca dos impactos ambientais causados pela indústria da moda, além de desenvolver ações e projetos de forma a aumentar a ascensão deste setor alertando os impactos ambientais. Tais abordagens apelam pela importância da transparência do setor produtivo têxtil e são medidas que aceleram que mudanças sejam feitas pelas grandes empresas. Esses diálogos abertos permitem vislumbrar um panorama mais amplo e incentivar a busca por soluções em conjunto.

### 5.2.1 Legislações

Políticas e regulamentações são medidas eficazes para trazer mudanças em grande escala para a indústria. Uma das principais ações no setor foi a criação, em 2015, do Grupo de Estudo de Produtos Danosos, coordenado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), com apoio da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confecção (Abit) e da Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim), que se reuniram para criar a primeira norma brasileira sobre produtos químicos tóxicos em artigos têxteis. Alinhada com a ABNT NBR 16787:2019, esta cartilha contém substâncias químicas tóxicas utilizados em processos têxteis úmidos, podendo citar: polifluorcarbonos com oito carbonos (PFOS e PFOAS); amins aromáticas/corantes azo; alquilfenóis e nonilfenol; corantes dispersos alergênicos; metais pesados (chumbo, cádmio, mercúrio, cromo e níquel); formaldeído, pesticidas, compostos organoestanosos e fenóis (pentaclorofenol e tetraclorofenol).

A Lista de Substâncias Restritas, contendo estes dez grupos prioritários, ao contrário das regulamentações, tem caráter voluntário e não visa banir, mas estipular limites para o uso das substâncias nocivas na produção têxtil. (ABIQUIM; ABIT; ABNT; ABVTEX, 2019)

Levando em consideração que, ainda, a utilização de produtos têxteis são pautados sob o preço, é muito importante que existam, sob forças de lei, o banimento de produtos químicos,

comprovados como insustentáveis. E mais do que isso, sejam feitas fiscalizações para averiguar tais adequações.

### 5.2.2 Certificações

Além da legislação, utilizam-se também as Certificações Ambientais de institutos internacionais reconhecidos, que promovem a confiabilidade nos produtos, facilitando o comércio entre as empresas (JACQUES, 2011). Este interesse das empresas, fazem com que as certificações gerem incentivo à mudanças devido a competitividade que gera. Acerca da linha de pesquisa do trabalho, pode-se citar os principais selos associados:

- **OEKO-TEX®**: Programa globalmente reconhecido de compromisso ambiental e saúde humana que demonstra a ausência de substâncias nocivas em têxteis e vestuário através de testes certificados. É o primeiro rótulo que garante as qualidades ecológicas dos têxteis. Todos os têxteis e tintas certificados são, portanto, não tóxicos.
- **Bluesign®**: A certificação *Bluesign* avalia todos os fluxos de insumos produtivos - como matérias-primas, insumos químicos, consumo de água e energia - com o objetivo de, posteriormente, oferecer soluções tecnológicas e de gestão soluções. ou alternativas mais sustentáveis de substituição de insumos (com foco, por exemplo, na eliminação total de substâncias perigosas), matérias-primas e processos produtivos. O sistema é baseado em cinco princípios: produtividade de recursos; segurança do consumidor; águas residuais; emissão de gases de efeito estufa; saúde e segurança ocupacional – que garantem que o produto final atenda aos mais exigentes mercados e consumidores sem comprometer sua funcionalidade.
- **ZDHC®**: A ZDHC é uma certificação que faz parte do programa “Descarte Zero de Produtos Químicos Perigosos”, no qual surgiu em 2011 por meio da iniciativa de diversas marcas que tinham o interesse de substituir produtos químicos nocivos por produtos mais seguros aos trabalhadores e consumidores finais (ZDHC, 2021). Essa certificação está associada ao gerenciamento de substâncias restritas durante o processo de fabricação, disponibilizando uma lista com todos os produtos restritos. O objetivo está em substituir os produtos químicos de processo com alto poder poluente ou propriedades tóxicas por outros que tenham menor impacto na qualidade do efluente. (SGC, 2019). O programa incentiva essa transição através de três pilares: Treinamento,

avaliação e implementação; dando uma visão geral de toda a cadeia de fornecimento para averiguar se estão em conformidade com os produtos adequados.

Assim, a partir dessas considerações, a seguir será abordada a conclusão do presente estudo.

## 6 CONCLUSÃO

As abordagens sob um olhar apurado acerca do modo da produção têxtil, em específico nos processos de beneficiamento permitiram observar a complexidade e diversidade dos processos e como estes impactam no meio ambiente. Nele, há um grande número de processos químicos e mecânicos envolvidos, qual cada processo tem um impacto diferente no meio ambiente. De modo geral, os problemas ambientais da indústria têxtil estão associados ao alto uso da água e energia, emissão de gases, produtos químicos utilizados e toxicidade dos efluentes.

O olhar voltado para ações e medidas que tornam menor o impacto ambiental dos processos de beneficiamento vem crescendo, e cada vez mais, novas medidas vêm surgindo com esta intenção. Através dos conceitos de *Química Verde*, essas operações vão desde tarefas simples até iniciativas mais avançadas, como processo de substituição de produtos químicos potencialmente poluentes por outros que têm menos impacto na qualidade do efluente e novas tecnologias. Tecnologias ainda precisam ser aprofundadas a níveis industriais de larga escala, entretanto, muitos estudos já comprovam sua eficácia.

A biotecnologia industrial permite o uso de enzimas para processos de acabamento têxtil de grande potencial, devido suas vantagens ecológicas por serem produzidas com recursos renováveis, necessitar de menos água e energia em seus processos. Uma resistência ainda existe dado seu alto custo, e devido à sensibilidade a mudanças como pH e temperatura. Entretanto, com o potencial averiguado, faz-se necessário incentivos a pesquisas para aprimorar esta tecnologia.

Foi visto como a deposição de vapor químico aprimorada por plasma, é uma alternativa ecológica ao acabamento úmido tradicional que economiza grandes quantidades de água. As pesquisas demonstram ser um acabamento muito mais eficaz usando muito menos produtos químicos.

O gás supercrítico como alternativa ao tingimento usual é uma tecnologia que vem crescendo e já possui comprovações à nível industrial. Esta técnica que não necessita de água em uma etapa conhecida por seu grande impacto negativo nos efluentes, demonstra grande potencial. Atualmente, sua ascensão ocorre apenas com eficiência nas fibras sintéticas. As fibras hidrofílicas são mais difíceis de tingir usando esta técnica. Visto seu potencial, a pesquisa voltada a esta tecnologia que não necessita de água, às demais fibras se demonstra essencial.

Foi possível analisar que no Brasil, ainda existem barreiras que dificultam a adesão de novas tecnologias e abordagens. Uma ação satisfatória seria acerca dos incentivos fiscais, à pesquisa, programas, certificações e principalmente fiscalizações.

Não há dúvida de que há um consenso geral de que uma abordagem mais sustentável deve ser um objetivo pelo qual devemos lutar para e, no campo dos têxteis, o progresso tem sido lento, mas firme. Existe hoje uma consciência muito maior de questões ecológicas e éticas do que há uma década, embora a vontade de investir em sustentabilidade continue sendo ditada pelo custo. Embora não sejam aplicáveis a todas as situações, a abordagem de gerenciamento descrita neste trabalho pode ser usada como incentivo à mudanças. A chave para reduzir com sucesso o uso de água e produtos químicos é começar a procurar.

A indústria está passando por grandes mudanças, e é sabido que a competitividade das empresas dependerá de novos padrões de produção, assim como novas relações de trabalho e comercialização ao longo da cadeia de valor. Entre outros benefícios, estratégias de sustentabilidade podem proporcionar processos mais eficientes, redução de custos, diferenciação no mercado e relacionamentos mais sólidos e de longo prazo entre empresas de diferentes elos da cadeia. Isto é, o potencial da sustentabilidade como impulsionadora da competitividade é incontestável. Uma adoção mais ampla de uma abordagem de gestão permitirá ao setor têxtil tornar-se mais competitivo e mais capaz de responder com eficácia, não só aos atuais desafios ambientais, mas também aos desafios mais amplos colocados pelo ambiente competitivo em que a indústria opera.

## REFERÊNCIAS

AATC. **American Association of Textile Chemists and Colorists**. 2010. Disponível em: <https://www.aatcc.org/>. Acesso em: 30 nov. 2022.

AGUIAR, Catia Rosana Lange (org.). *et al.* **ENGENHARIA TÊXTIL: uma abordagem simplificada**. Florianópolis: Editora da UFSC. 311 p. ISBN: 9786558050513. 2022.

AMORIM, A. M.; GASQUES, M. D. G.; ANDREAUS, J.; SCHARF, M. **The application of catalase for the elimination of hydrogen peroxide residues after bleaching of cotton fabrics**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 74 (3), p. 433-436, 2002

ARAÚJO, M.; CASTRO, E. M. **Manual de Engenharia Têxtil**. v. 2. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1984.

ARAÚJO, A. R. M.; FERREIRA, L. F.; FERREIRA, D. D. M.. **Gestão dos recursos hídricos: estudo sobre práticas ambientais adotadas por uma indústria têxtil**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v.8, n.2, p.99-109, 2017.

AVINC O; *et al.* **Supercritical carbon dioxide for textile applications and recent developments**. 8. In: IOP conference series: materials science and engineering, vol. 254: p. 08, 2017.

BABU, B.R.; PARANDE, A.; RAGHU, S.; KUMAR, T.P.. **Textile technology an overview of wastes produced during cotton textile processing and effluent treatment methods**. J. Cotton Sci.. Vol. 11(1): p. 110-122. 2007.

BASTIAN, E.Y.O.; ROCCO, J.L.S. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**. São Paulo: Cetesb, Sinditêxtil, 85 p., 2009.

BASTIAN, Elza *et al.* **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**. São Paulo: CETESB - SINDITÊXTIL, 2009.

BELTRAME, Leocádia Terezinha Cordeiro. **Caracterização de Efluente Têxtil e Proposta de Tratamento**. 2000. 179 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.

BLACKBURN, R. S. **Sustainable textiles: Life cycle and environmental impact**. Inglaterra. Woodhead Publishing, 2009. Disponível em: [https://www.abint.org.br/naotecidos/o-que-sao#:~:text=Conforme%20a%20norma%20NBR%2D13370,\(coes%C3%A3o\)%20e%20combina%C3%A7%C3%B5es%20destes](https://www.abint.org.br/naotecidos/o-que-sao#:~:text=Conforme%20a%20norma%20NBR%2D13370,(coes%C3%A3o)%20e%20combina%C3%A7%C3%B5es%20destes). Acesso em: 30 nov. 2022.

BRISTI, U.; PIAS, A.K.; LAVLU, F.H.. **A Sustainable process by bio- scouring for cotton knitted fabric suitable for next generation**. J. Text. Eng. Fashion Technol. Vol. 5(1): p. 41-48.

CAI, Z., *et al.* **Effect of atmospheric plasma treatment on desizing of PVA on cotton**. Textile Research Journal. 73(8), p. 670–674, 2003.

CAMPOLINA, Amanda Castro. **Viabilidade de um tingimento reativo sustentável com redução de eletrólito e de produto auxiliares.** 2022. 67f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

CARVALHO, N. A. **Design de Superfície:** estudo comparativo de processos de estamparia têxtil sob enfoque ambiental. 138 f. Dissertação (mestrado) - Pós Graduação em Design, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CASULLO P, Soubirón. **Química Verde:** Metas, Desafíos y Formas de Contribuir a su Desarrollo desde La Enseñanza Media. In: Moyna P, *et al.*, Aportes de La Química al Mejoramiento de La Calidad de Vida, p. 15-45. Montevideú, 2012.

CAVACO-PAULO, A. and Gubitz, G.M. **Textile Processing with Enzymes.** Woodhead Publishing Limited, 2003.

CHANKRABORTY, J. N. **27— Dyeing in super-critical carbon dioxide.** In Fundamentals and practices in coloration of textiles. p. 299–306. 2010.

CHINTA S, *et al.* **Plasma technology and its application in textile wet processing.** Int. J. Eng. Res. Technol. 1(5): p. 1-12, 2012.

CHOUDHURY, Roy. **Green chemistry and the textile industry.** Text. Prog. 2013 DOI: 10.15406/jteft.2017.02.00056. Jul. 2017. Disponível em: <https://medcraveonline.com/JTEFT/green-chemistry-and-textile-industry.html>. Acesso em: 30 nov. 2022.

CHOUDHURY, Roy. Principal KPS. **Green chemistry and textile industry.** J. Textil. Eng. Fash. Technol. 2017;2(3):351e61.

COLERATO, Marina. **A Indústria da Moda Brasileira e Seus Principais Desafios Para Sustentabilidade.** Modifica. Jul. 2019. Disponível em: <https://www.modifica.com.br/panorama-industria-moda-sustentavel-brasileira/#:~:text=Se%20as%20pessoas%20n%C3%A3o%20entram,redesenho%20de%20modelo%20de%20neg%C3%B3cio>. Acesso em: 30 nov. 2022.

COLERATO, Marina. **A Indústria da Moda Brasileira e Seus Principais Desafios Para Sustentabilidade.** MODEFICA. 2019.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Têxtil e Confecção:** Inovar, Desenvolver e Sustentar. Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. – Brasília: CNI/ABIT, 2012.

DOSHI, R.; SHELKE, V. **Enzymes in textile industry:** An Environment-friendly approach. Indian Journal of Fibres and Textile Research, v. 26, p. 202-205, 2001.

EL-NAGAR, M. A. Saady, A. I. Eatah & M. M. Masoud. DC **pseudo plasma discharge treatment of polyester textile surface for disperse dyeing.** The Journal of The Textile Institute, 97:2, 111-117, DOI: 10.1533/joti.2005.0169. 2006.

ETBPP. **Water And Chemical Use In The Textile Dyeing And Finishing Industry**. Entec Uk Ltd, 1997. Disponível em: <https://docplayer.net/20876113-Water-and-chemical-use-in-the-textile-dyeing-and-finishing-industry.html>. Acesso em: 30 nov. 2022.

EYUPOGLU, Seyda; MERDAN, Nigar. **Chapter 2 Eco-friendly Production Methods in Textile Wet Processes**. Sustainable Innovations in Textile Chemical Processes, 2018.

FILIPPI, Jully. **Beneficiamento Textil**. Blumenau. Universidade Federal de Santa Catarina. 2019.

FLETCHER, Kate. **Sustainable fashion and textiles design journeys**. UK: Ed. Earthscan, 2008.

FREITAS, Kátya Regina de. **Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/30365420>. Acesso em: 12 nov. 2022.

FURLAN, F. R., **Caracterização e aplicação de enzimas de forma combinada na biopreparação de tecidos felpudos de algodão**. Pós-Graduação em Engenharia Química: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

FERREIRA, D.D, SPANHOL, G.K. e KELLER, J. **Gestão do processo têxtil: Contribuições á sustentabilidade dos recursos hídricos**. V congresso nacional de excelência em gestão. Niterói, RJ, Brasil, 2, 3 e 4 de julho de 2009.

GARBASSI, F.; MORRA, M.; OCCHIELLO, E.. **Polymer Surfaces: from physics to technology**. Chichester, John Wiley & Sons. 462 p.. 1994.

GEMCI, R. **Examining the effects of mercerization process applied under different conditions to dimensional stability**. Sci. Res. Essays. Vol. 5(6): P. 560-571, 2010.

GIORDANO, J. **Tratamento de superfície em materiais têxteis compostos algodão por plasma**. Tese de Doutorado: Unicamp – Engenharia Química. 5 nov. 2007. Orientador: Prof. Dr. João Sinézio de Carvalho Campos. CONTEXMOD. 162 p., 2016.

GURSOY, N.C.; HALL, M. E. **Optimisation of peroxide bleaching**. International Textile Bulletin, v. 5, p. 80-86, 2001

HENDRIX *et al.* **Progress in supercritical CO<sub>2</sub> dyeing**. J. Ind. Text. 31(1): p. 43-56, 2001.

HENDRIX *et al.*, Butcher DL. **Supercritical fluid technology in textile processing: an overview**. Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 39: p. 4806-4812, 2000.

HOLKAR, C. R.; JADHAV, A. J.; PINJARI, D. V., MAHAMUNI, N. M.; PANDIT, A. B. (2016). **A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches**. 182, 351–366.

IBRAHIM DF. **Clean trends in textile wet processing**. Text. Sci. Eng. Vol. 2(5): p. 1-4. 2012.

IBRAHIM NA, EID BM. **Plasma treatment technology for surface modification and functionalization of cellulosic fabrics**. Advances in functional finishing of textiles. Springer; p. 275-287, 2020.

IBRAHIM, N.; HUSSAIN, C. Green chemistry for sustainable textiles Modern Design and Approaches. United Kingdom: **Woodhead Publishing**, 2021. 502 p.

KALE MJ; BHAT NV. **Effect of microwave pretreatment on the dyeing behaviour of polyester fabric**. Color. Technol. 2011; 127(6): p. 365-71.

KAN, C. W.; CHEUNG, H. F.; CHAN, Q. A study of plasma-induced ozone treatment on the colour fading of dyed cotton. **Journal of Cleaner Production**, 112, 3514–3524. 2016.

KARAHAN, H. A. *et al.* **Effects of atmospheric pressure plasma treatments on certain properties of cotton fabrics**. Fibres & Textiles in Eastern Europe, 2 (73), p.19–22, 2009.

KUNZ, A.; ZAMORA, P.; MORAES, S.; DURÁN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Quim. Nova**, Vol. 25, No. 1, 78-82, 2002.

LEE, KE. **Environmental sustainability in the textile industry**. In: Muthu SS, editor. Sustainability in the textile industry. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd; 2017. p. 17-56. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2639-3>.

LI, Y; HARDIN I. **Enzyme application for fiber processing**. Text. Chem. Color. 29(8): 71, 1997.

LICENCE, P.; KIE, J.; SOKOLOVA, M.; ROSS, S. K.; POLIAKOFF, M.. **Green Chem.**. Vol. 2, n. 99, 2003.

MACEDO, Mayara Atherino. **A gestão do design como fator de inovação em redes de empresas: o caso do Santa Catarina Moda e Cultura (SCMC)**. Dissertação de Mestrado. Programação de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MARROQUES, Julia Cruz. **Aplicações de enzimas na indústria têxtil**. 2020. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

MARTINS, G. B. H. **Práticas Limpas Aplicadas às Indústrias Têxteis de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997.

MELIN, Giovanna Rodrigues; COSTA, Silgia Aparecida; ARAÚJO, Maurício Campos. **Processos sustentáveis e conhecimento sobre Química Verde em pequenas empresas do setor de beneficiamento têxtil**. **Revista Tecnologia e Sociedade**. vol. 7, núm. 12, 2011, pp. 1-8. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, Brasil

MODEFICA. **Fios da Moda: Perspectiva Sistêmica Para Circularidade**. 10 fev. 2020. São

Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.modifica.com.br/relatorio-fios-da-moda-2/>. Acesso em: 30 nov. 2022.

MOJISOV K. Enzyme scouring of cotton fabrics: a review. *Int. J. Market. Technol.* Vol. 2(9): p. 256-275. 2012.

MOJISOV, Kiro. **Application of enzymes in the textile industry**: a review. Jahorina, March 09th to 11th, 2011

MONTERO GA, *et al.* **Supercritical fluid technology in textile processing: an overview.** *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 39: p. 480612, 2000.

MORENT, R. *et al.* **Nonthermal plasma treatment of textiles.** *Surface & Coatings Technology*, 202(14), 3427–3449. 2008.

MUTHU SS. **Textiles and clothing sustainability**: sustainable textile chemical processes. Springer; 2016.

NAEBE M. **Cleaner dyeing of textiles using plasma treatment and natural dyes**: a review. *J. Clean. Prod.* 265(2020): p. 1-62. 121866, 2020.

NETTLES, JE. **Handbook of chemical specialties**: textile fiber processing, preparation, and bleaching. New York: Wiley; 1983.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Report of the World Commission on Environment and Development**: Our Common Future. 1987.

PARTHA, Pratim das *et al.* **Principle of Green Chemistry**: A modern perspective for development of sustainable textile fiber-based green nanocomposites. Department of Mechanical Engineering: Amity University Uttar Pradesh - Noida, India. Disponível em: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>. Acesso em: 20 nov. 2022.

PAZDZIOR, K.; BILINSKA, L.; LEDAKOWICZ, S.. **A review of the existing and emerging technologies in the combination of AOPs and biological processes in industrial textile wastewater treatment.** *Chem. Eng. J.* Vol. 376: p.120-597. 2019.

PEREIRA, Jean. **Água na indústria têxtil**: características, tratamento, alternativas de economia e reuso. Americana: 2015. 58f.

QUEIROZ, Marluce Teixeira Andrade *et al.* **Gestão de resíduos na indústria têxtil e sua relação com a qualidade da água**: estudo de caso. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, v. 8, n. 15, p. 114-135, 2016.

RADETIC M, Jovancic P, Puac N, Petrovic ZL. **Environmental impact of plasma application to textiles.** *J. Phys. Conf. Ser.* 71(1): p. 12-17, 2007.

RAMOS, Maria. **Química Verde**: potencialidades e dificuldades da sua introdução no ensino básico e secundário. Universidade de Lisboa: Mestrado em Química para o ensino, 2009.

RASHESH, Doshi; *et al.* **Enzymes in textile industry**: An environment-friendly approach. (India) Pvt Ltd, Mumbai 400012, India, 2001.

ROBINSON T *et al.* **Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative.** *Bioresour. Technol.*; 77(3): 247 e 55, 2001.

ROCKY, A.B.P.. **Comparison of effectiveness between conventional scouring & bio-scouring on cotton fabrics.** *Int. J. Sci. Eng. Res.*. Vol. 3: p. 1-5. 2012

SAMANTA KK, Basak S, Chattopadhyay S, Gayatri T. **Water-free plasma processing and finishing of apparel textiles.** *Handbook of sustainable apparel production.* CRC Press. p. 16-51, 2015.

SANTOS, Maria Eduarda Kuster Nogueira. **A Inserção de um Beneficiamento Têxtil Sustentável e seus Impactos.** 2021. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

SANTOS, S. **Impacto ambiental causado pela indústria têxtil.** UFSC: Engenharia de Produção e Sistemas. Florianópolis- SC. 2011.

SERNIABAT, Shahid Abdur Rab. **Textile Engineering College Barisal.** 2018. Disponível em: <https://www.slideshare.net/DebubrataModak/plasma-technology-in-textile-wet-processing>. Acesso em: 20 nov. 2022.

SGS. Zdhc: **Importância Para Industria Têxtil Entenda Mais Sobre A Gestão De Produtos Químicos E Gerenciamento De Resíduos Visando O Descarregamento Zero Na Indústria Têxtil.** 2019. Disponível em: [https://www.sgsgroup.com.br/pt-br/news/2019/06/programa\\_zdhc](https://www.sgsgroup.com.br/pt-br/news/2019/06/programa_zdhc). Acesso em: 30 nov. 2022.

SINGH S. **Aspergillus enzymes for textile industry.** In: *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering.* Elsevier;. p .191, 2016.

SISODIA, N.; BHARGAVA, A. **Plasma technology in textiles.** CABDIRECT. 2016 Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20163339900>. Acesso em: 13 nov. 2022.

SUN, Faqian *et al.* **Organics and nitrogen removal from textile auxiliaries wastewater with A2O-MBR in a pilot-scale.** *Journal Of Hazardous Materials*, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389415000333>. Acesso em: 30 nov. 2022.

SHAH J, SHAH S. Innovative plasma technology in textile processing: a step towards green environment. **Res. J. Eng. Sci.** 2(4): p. 34-39, 2013.

SAXENA S, RAJA ASM, ARPUTHARAJ A. **Challenges in sustainable wet processing of textiles.** In: Muthu S, editor. *Textiles and clothing sustainability.* Singapore: Springer; 2017. p. 43e79

TELI MD. **Textile coloration industry in India.** *Color. Technol.* vol. 124. 2008.

TELLES, Dirceu *et al.* **Reuso da água: conceitos, teorias e práticas.** 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2010. Pp. 192-193.

TWARDOKUS, Rolf. Reuso De Água No Processo De Tingimento Da Indústria Têxtil. Portal Tratamento da Água. 2020. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/reuso-agua-industria-textil/#:~:text=A%20%C3%A1gua%20na%20ind%C3%BAstria%20t%C3%AAxtil,os%20banhos%20de%20descarte%20diretament>. Acesso em: 30 nov. 2022.

TZANOV T, Calafell M, Guebitz GM, Cavaco-Paulo A. **Bio-preparation of cotton fabrics.** *Enzym. Microb. Technol.* 29(6): 357-62, 2001.

WADJE, P.R.. **Textilee Fibre to fabric processing.** *J. Inst. Eng. Part TX Text. Eng. Div.* vol. 90: p. 28-36. 2009.

WU J, Zhao H; WANG M, Zhi W; XIONG X, Zheng L. **A novel natural dye derivative for natural fabric supercritical carbon dioxide dyeing technology.** *Fiber. Polym.* 2019; 20(11): 2376-82.

YAMANE, Laura Ayako. **Estamparia têxtil.** 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/27/27159/tde-20052009-132356/>. Acesso em: 13 dez. 2022.

YOSHIGA, A.; TOFFOLI, S. M.; WIEBECK, H. **Estudo do Composto PVC Reciclado/CaCO. Polímeros: Ciência e Tecnologia,** v. 14, n. 3, p. 134-141, 2004.

YUSUF, Mohd. **Current and future perspectives of enzyme treatments for cellulosic fibers: a review Mohd Yusuf Department of Natural and Applied Sciences.** School of Technology, The Glocal University, Saharanpur, Uttar Pradesh, India. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323852043000208>. Acesso em: 30 nov. 2022.

ZDHC. **Chemical Management System Technical Industry Guide Version 1.0.** 66 p., 2021. Disponível em: <https://downloads.roadmaptozero.com/process/ZDHC-CMS-TIG>. Acesso em: 30 nov. 2022.