



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS BLUMENAU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL

GUIDO HOBOLT

**Aplicação de rotas enzimáticas no processo primário do beneficiamento, desengomagem,  
purga e pré-alveamento do substrato de algodão**

BLUMENAU

2023

GUIDO HOBOLT

**Aplicação de rotas enzimáticas no processo primário do beneficiamento, desengomagem,  
limpeza e pré-alveamento do substrato de algodão**

Qualificação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Têxtil.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Rita de Cássia Siqueira Curto Valle.

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Ana Paula Serafini Immich Boemo

Coorientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Janaina de Souza Lima

BLUMENAU

2023

## FICHA DE IDENTIFICAÇÃO DA OBRA

Hobolt, Guido

Aplicação de rotas enzimáticas no processo primário do beneficiamento, desengomagem, limpeza e pré-alvejamento do substrato de algodão / Guido Hobolt ; orientador, Rita de Cassia Siqueira Curto Valle., coorientador, Ana Paula Serafini Immich Boemo, 2023.

91 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Biotecnologia. 3. Processos têxteis. 4. Enzimas. 5. Sustentabilidade. I. Siqueira Curto Valle., Rita de Cassia. II. Serafini Immich Boemo, Ana Paula . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil. IV. Título.

Guido Hobolt

**Aplicação de rotas enzimáticas no processo primário do beneficiamento, desengomagem,  
limpeza e pré-alveamento do substrato de algodão**

O presente trabalho em nível de qualificação de mestrado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.

Universidade Federal de Santa Catarina

Universidade Federal de Santa Catarina

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de qualificação que foi julgado  
adequado como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Têxtil, na  
área de Sustentabilidade no setor têxtil.

---

Prof.<sup>a</sup> Rita de Cássia Siqueira Curto Valle, Dra.

Orientadora

---

Prof.<sup>a</sup> Fernanda Steffens, Dra.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Blumenau, 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus, bem como à minha família, pela inestimável assistência prestada durante a realização do meu trabalho de mestrado. Além disso, desejo estender meus sinceros agradecimentos à minha orientadora, cuja notável paciência e valiosas orientações foram fundamentais para a conclusão deste projeto. Também gostaria de reconhecer a UFSC por ter me concedido a oportunidade de embarcar nessa jornada acadêmica, assim como todo o corpo docente que contribuiu para o meu desenvolvimento acadêmico.

“A simplicidade é o último grau de sofisticação”

Leonardo Da Vinci

## RESUMO

A indústria têxtil, notória por sua contribuição significativa para a poluição ambiental, tem buscado alternativas mais sustentáveis para mitigar seus impactos. Este estudo focaliza a aplicação da biotecnologia, especificamente o uso de enzimas, como uma alternativa promissora aos tradicionais processos químicos. O objetivo principal é avaliar o desempenho dos processos de desengomagem, limpeza e pré-alveijamento em substratos de algodão, usando rotas enzimáticas em comparação com os métodos convencionais. Para atingir esse objetivo, foram conduzidos experimentos controlados em laboratório, observando a eficiência das enzimas em diferentes etapas do beneficiamento têxtil, incluindo remoção de goma, ganho de hidrofiliidade e branqueamento. Os resultados obtidos com as enzimas na etapa de desengomagem foram avaliados de 6 a 9 na escala de Tegewa, enquanto os métodos oxidativos variaram entre 1 e 3. Além disso, a purga enzimática mostrou-se superior nos testes da NBR 13000, evidenciando um maior poder de absorção em menor tempo. O alveijamento também apresentou melhorias significativas. As conclusões da pesquisa apontam para uma eficácia superior dos métodos enzimáticos, destacando sua capacidade de operar de maneira eficiente em temperaturas mais amenas, reduzindo o consumo de água, energia e tempo. O estudo também aborda a concentração ideal das enzimas, enfatizando que concentrações acima de 0,25 g/L não resultam em benefícios adicionais. Além disso, a pesquisa ressalta as vantagens econômicas e ambientais das rotas enzimáticas, incluindo custos em torno de 26% inferiores e redução na geração de efluentes. Este trabalho contribui substancialmente para o desenvolvimento da aplicação de enzimas na indústria têxtil, fornecendo insights valiosos para a implementação prática e a otimização desses processos. Ressaltando que a utilização de rotas enzimáticas melhoram o ambiente de trabalho, reduzindo possibilidades de acidentes com agentes químicos, bem como melhora a afinidade do método com o meio ambiente, deixando uma indústria com menor geração de efluentes nocivos ao meio ambiente.

**Palavras-chave:** Biotecnologia; Enzimas; Processos têxteis; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The textile industry, known for its significant contribution to environmental pollution, has been seeking more sustainable alternatives to mitigate its impacts. This study focuses on the application of biotechnology, specifically the use of enzymes, as a promising alternative to traditional chemical processes. The main objective is to evaluate the performance of the processes of desizing, cleaning, and pre-bleaching on cotton substrates using enzymatic routes in comparison to conventional methods. To achieve this goal, controlled laboratory experiments were conducted, observing the efficiency of enzymes at different stages of textile processing, including gum removal, hydrophilicity improvement, and bleaching. The results obtained with enzymes in the desizing stage were rated from 6 to 9 on the Tegewa scale, while oxidative methods ranged from 1 to 3. Furthermore, enzymatic scouring proved to be superior in NBR 13000 tests, demonstrating greater absorption capacity in less time. Bleaching also showed significant improvements. The research findings point to the superior effectiveness of enzymatic methods, highlighting their ability to operate efficiently at milder temperatures, reducing water, energy, and time consumption. The study also addresses the optimal enzyme concentrations, emphasizing that concentrations above 0.25 g/L do not yield additional benefits. Additionally, the research highlights the economic and environmental advantages of enzymatic routes, including around 26% lower costs and a reduction in effluent generation. This work substantially contributes to the development of enzyme application in the textile industry, providing valuable insights for practical implementation and process optimization. It emphasizes that the use of enzymatic routes improves the working environment, reducing the possibility of accidents involving chemical agents, and enhances the method's compatibility with the environment, leading to an industry with lower generation of environmentally harmful effluents.

**Keywords:** Biotechnology; Enzymes; Textile Processes; Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas de tecido plano (a) e malhas (b) .....	22
Figura 2 - Micrografia em sentido longitudinal da fibra de algodão madura .....	24
Figura 3 - Esquema da fibra do algodão: estrutura e camadas .....	26
Figura 4 - Esquema de catalise enzimática chave-fechadura .....	32
Figura 5 - Atuação das pectinases na molécula de pectina .....	35
Figura 6 - Reação da oxidação da glicose pela GOx .....	36
Figura 7 - Ligação alfa-glicosídica no amido .....	37
Figura 8 - Processos e fases utilizando atividade enzimática.....	39
Figura 9 - Ciclo de aplicação enzimática .....	41
Figura 10 - Processo de desengomagem enzimática e alveijamento convencional.....	44
Figura 11 - Estágios do desenvolvimento da pesquisa .....	51
Figura 12 - Processo de Desengomagem e alveijamento oxidativo .....	52
Figura 13 - Desengomagem oxidativa .....	53
Figura 14 - Ensaios realizados na etapa de desengomagem enzimática .....	56
Figura 15 - Gráfico do processo de limpeza (purga) enzimática.....	57
Figura 16 - Desengomagem, purga e alveijamento enzimático simultâneo.....	59
Figura 17 - Escala de Tegewa.....	61
Figura 18 - Curva de Calibração para Azul de Metileno .....	64
Figura 19 - Espaço de cor CIELAB.....	65
Figura 20 - Teste de tração no dinamômetro.....	66
Figura 21 - Gotas de reagente iodeto de potássio com tratamento enzimático .....	67
Figura 22 - Gotas de reagente iodeto de potássio com tratamento oxidativo.....	68
Figura 23 - Processo desengomagem oxidativo comparativo com escala de Tegewa .....	70
Figura 24 - Avaliação visual da desengomagem enzimática .....	70
Figura 25 - Comportamento do residual de amido nos tecidos biodesengomados dos parâmetros concentração de enzima e pH (A) e concentração de enzima e temperatura (B)..	73
Figura 26 - Teste de hidrofiliade vertical por capilaridade .....	75
Figura 27 - Teste de hidrofiliade NBR 13000 .....	76
Figura 28 - Coloração adquirida com azul de metileno .....	77
Figura 29 - Valores empíricos de consumo de vapor na indústria têxtil.....	91

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição da fibra do algodão cru.....	25
Quadro 2 - Classificação da enzima péctica.....	35
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do uso de enzimas nos processos têxteis.....	39
Quadro 4 - Enzimas utilizadas na fase de preparação do algodão.....	43
Quadro 5 - Formulação da solução de engomagem aplicada aos fios de urdume.....	49
Quadro 6 - Relação de equipamentos utilizados durante a pesquisa.....	50
Quadro 7 - Agentes e reagentes utilizados.....	50
Quadro 8 - Formulação e dados do processo integrado em banho único de desengomagem enzimática e processos oxidativos.....	58
Quadro 9 - Formulação do alvejamento enzimático.....	59
Quadro 10 - Formulações utilizadas e resultados observados na escala de Tegewa.....	71
Quadro 11 - Teor de pectinas no substrato.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações técnicas do tecido 100 % algodão engomado .....	49
Tabela 2 - Agentes utilizados na desengomagem convencional .....	54
Tabela 3 - Experimentos realizados no laboratório. ....	55
Tabela 4 - Formulações da etapa de purga enzimática .....	57
Tabela 5 - Tabela Custos de agentes químicos utilizado nas formulações .....	58
Tabela 6 - Custos por processos e enzimas .....	60
Tabela 7 - Valores de concentração de amido em tecidos - Escala Tegewa .....	61
Tabela 8 - Produtos químicos utilizados no tingimento.....	65
Tabela 9 - Efeitos dos fatores Concentração de enzima (0,25; 0,5, 1,0 %), pH (7,0 e 8,5) e Temperatura (70 °C e 85 °C) sobre a remoção de amido no processo de biodesengomagem enzimática e a análise de variância (ANOVA).....	72
Tabela 10 - Avaliação do grau de branco em Espectrofotômetro de Graus Berger .....	79
Tabela 11 - Resultados espectrofotômetro 0,25% de cor vermelho .....	81
Tabela 12 - Resultados espectrofotômetro 0,50% de cor vermelho .....	81
Tabela 13 - Resultados espectrofotômetro 1,00% de cor vermelho .....	81
Tabela 14 - Comparativo da resistência de tração entre os dois processos de alvejamento ....	82
Tabela 15 - Comparativo de custos entre processo oxidativo e enzimático.....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção

ABS – Absorbância

CAGR – *Compound Annual Growth Rate* (Taxa de Crescimento Anual Composta)

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

g – Grama

g/L – Gramas por Litro

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IUPAC – *International Union of Pure and Applied Chemistry* (União Internacional de Química Pura e Aplicada)

mL - Mililitros

Nm – Nanômetros

R - Refletância

RPM - Revoluções por Minuto

TAED - Tetracetililenodiamina

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>DIAGRAMA CONCEITUAL .....</b>	<b>15</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	16
1.2 OBJETIVOS.....	19
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>19</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>19</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>20</b>
2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL .....	20
2.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO TÊXTIL .....	21
2.3 FIBRAS TÊXTEIS.....	23
<b>2.2.1 Algodão .....</b>	<b>24</b>
2.4 PROCESSOS TÊXTEIS .....	26
<b>2.4.1 Desengomagem .....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2 Purga.....</b>	<b>28</b>
<b>2.4.3 Pré-alveijamento/alveijamento .....</b>	<b>31</b>
2.5 ENZIMAS .....	32
<b>2.5.1 Pectinase .....</b>	<b>34</b>
<b>2.5.2 Glicose Oxidase .....</b>	<b>36</b>
<b>2.5.3 Alfa amilase .....</b>	<b>37</b>
<b>2.5.4 Enzima Peroxidase .....</b>	<b>38</b>
2.6 ENZIMAS NA INDÚSTRIA TÊXTIL.....	38
<b>2.6.1 Biodesengomagem enzimática .....</b>	<b>43</b>
<b>2.6.2 Bioalveijamento .....</b>	<b>44</b>
<b>3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>49</b>
3.1 SUBSTRATO TÊXTIL.....	49
3.2 EQUIPAMENTOS E REAGENTES UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS .....	50

3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	51
<b>3.3.1 Desengomagem e pré-alveamento oxidativo .....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.2 Desengomagem oxidativa .....</b>	<b>53</b>
<b>3.3.3 Ensaios enzimáticos.....</b>	<b>54</b>
<b>3.3.4 Bidesengomagem enzimática .....</b>	<b>54</b>
3.3.4.1 Limpeza (purga) enzimática .....	56
3.4 PRÉ-ALVEJAMENTO .....	57
<b>3.4.1 Processo sequencial de desengomagem, purga e alveamento oxidativo .....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.2 Processo sequencial de bidesengomagem, biopurga e bioalveamento.....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.3 Bioalveamento .....</b>	<b>59</b>
3.5 ENSAIOS ANALÍTICOS .....	61
<b>3.5.1 Determinação da quantidade de amido residual no tecido.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5.2 Teste de hidrofiliade vertical por capilaridade .....</b>	<b>62</b>
<b>3.5.3 Teste de hidrofiliade por gotejamento (NBR 13000).....</b>	<b>62</b>
<b>3.5.4 Teor de pectina removida .....</b>	<b>63</b>
<b>3.5.5 Grau de brancura.....</b>	<b>64</b>
<b>3.5.6 Comportamento tintorial.....</b>	<b>65</b>
<b>3.5.7 Teste de tração.....</b>	<b>66</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>67</b>
4.1 AVALIAÇÃO DE DESENGOMAGEM.....	67
<b>4.1.1 Análise do residual de amido via gotejamento de iodeto de potássio .....</b>	<b>67</b>
<b>4.1.2 Análise do residual de amido via imersão em iodeto de potássio .....</b>	<b>69</b>
4.2 AVALIAÇÃO DA HIDROFILIDADE DO SUBSTRATO APÓS PURGA.....	75
<b>4.2.1 Avaliação de hidrofiliade vertical por capilaridade.....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.2 Avaliação de hidrofiliade por gotejamento (NBR 13000) .....</b>	<b>76</b>
4.3 AVALIAÇÃO DO TEOR DE PECTINA.....	77
4.4 AVALIAÇÃO DO PRÉ-ALVEJAMENTO.....	79

<b>4.4.1 Avaliação do grau de brancura por espectrofotômetro .....</b>	<b>79</b>
<b>4.4.2 Avaliação do comportamento tintorial.....</b>	<b>80</b>
<b>4.5 AVALIAÇÃO DO TESTE DE TRAÇÃO .....</b>	<b>82</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>857</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>857</b>

## DIAGRAMA CONCEITUAL

<b>Por que fazer?</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avaliar o impacto ambiental dos processamentos têxteis convencionais com agentes químicos</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compreender as consequências desse impacto ambiental;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Considerando que a indústria têxtil é uma das mais poluentes do planeta, por que ela ainda utiliza processos de beneficiamento que têm sido usados há décadas no substrato têxtil? Por que não mudar para processos mais ecologicamente amigáveis?;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por que não promover essas mudanças, utilizando produtos e processos alternativos e ambientalmente amigáveis, buscando alterar a imagem negativa que a indústria têxtil carrega?</li> </ul>
<b>Quem já fez?</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existem vários estudos e referências explorando o uso de processos alternativos por meio de rotas enzimáticas;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A desengomagem e a purga enzimática já são uma realidade em escala industrial em muitas empresas do ramo têxtil. No entanto, ainda não foram obtidos resultados satisfatórios no branqueamento;</li> </ul>
<b>Hipóteses</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Na maioria das empresas, a realidade é que os profissionais têm atuado por muito tempo com processos convencionais usando agentes químicos e não recebem informações sobre novos processos alternativos;</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outro fator que pode comprometer essa mudança são as próprias indústrias químicas, que de alguma forma procuram manter seu mercado ligado ao setor têxtil.</li> </ul>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A indústria têxtil, uma das mais antigas atividades de manufatura, tem como principal objetivo a transformação de fibras em fios e tecidos, compreendendo uma extensa e complexa cadeia produtiva (Berlim, 2016). Entretanto, essa indústria é considerada altamente impactante para o meio ambiente devido aos processos de beneficiamento que envolvem o uso significativo de água e energia, bem como a aplicação de produtos químicos em cada etapa. Esses processos resultam na geração de grandes volumes de efluentes com cargas elevadas de contaminantes, muitos potencialmente tóxicos, que requerem tratamento antes do descarte na natureza (Melo, 2022).

Apesar dos avanços científicos visando o desenvolvimento sustentável e a aplicação de novas tecnologias nas atividades industriais têxteis, verifica-se uma resistência à mudança dos sistemas produtivos tradicionais, especialmente em países emergentes, responsáveis por uma significativa parcela da produção têxtil global. Essa inércia agrava os impactos ambientais da indústria têxtil, originando poluentes provenientes dos agentes químicos utilizados nos processos, com potencial para afetar o solo, a água e a atmosfera (Oliveira, *et al.*, 2021).

Os processos que fazem uso de agentes químicos não apenas degradam as fibras, mas também geram efluentes que, quando não tratados adequadamente em estações de tratamento, causam significativos danos ao meio ambiente. Na etapa de beneficiamento, que emprega grandes volumes de água contendo surfactantes e outros elementos químicos prejudiciais, a dificuldade de tratamento decorre da classificação desses efluentes como compostos recalcitrantes e persistentes. Tais substâncias alteram os parâmetros físico-químicos das águas superficiais, acarretando sérios impactos ambientais (Silva *et al.*, 2020; Soares, 2015).

A pressão exercida por órgãos ambientais, regulamentações governamentais e a demanda dos consumidores por produtos sustentáveis têm instigado as empresas a implementar mudanças em suas operações e investir em práticas de fabricação mais sustentáveis (Research, 2023). Nesse contexto, torna-se crucial adotar novas tecnologias que minimizem os impactos ambientais (Silva, 2013).

A inserção de práticas sustentáveis na indústria têxtil não apenas reduz o impacto ambiental, mas também acarreta benefícios econômicos, melhora a imagem corporativa perante

a sociedade e os consumidores, além de proporcionar maior segurança aos colaboradores e à comunidade circunvizinha (Melo, 2022).

A biotecnologia emerge como uma alternativa sustentável que se alinha com as transformações necessárias no setor, apresentando vantagens significativas em comparação com os produtos químicos convencionais e, crucialmente, demonstrando plena compatibilidade com o meio ambiente. As aplicações de enzimas nos processos têxteis abrangem diversas etapas industriais, tais como a biodesengomagem, biolimpeza, bioalvejamento, biopolimento e bioestonagem (Besegatto, *et al.*, 2018).

Nos processos primários de tecido plano, a enzima  $\alpha$ -amilase é utilizada na etapa de desengomagem para a remoção da goma aplicada aos fios de urdume antes da tecelagem, visto que este polissacarídeo pode interferir na qualidade do tingimento. A pectinase é empregada na etapa de purga, removendo a pectina presente na fibra de algodão, facilitando a eliminação de impurezas e melhorando a hidrofilição do tecido. As celulases são empregadas no biopolimento para eliminar as fibrilas soltas da superfície do tecido de algodão, conferindo-lhe maior suavidade. A lipase é utilizada para a remoção de manchas de gordura que eventualmente possam estar presentes nas fibras de algodão, enquanto a protease é empregada na eliminação de proteínas, como manchas de suor, que possam estar presentes na fibra. Tais enzimas são adicionadas aos processos primários de tecido plano com a finalidade de assegurar a adequada preparação e limpeza das fibras de algodão, resultando em tecidos de qualidade superior (Shahid *et al.*, 2016; Tzanov *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2007). Ressalta-se, contudo, que a utilização de bioprocessos para a preparação do substrato ainda carece de mais pesquisa, desenvolvimento e investimentos para a disseminação dessa tecnologia. Ademais, faz-se necessário validar a eficácia e segurança desses bioprocessos em diferentes escalas e condições industriais (Rahman *et al.*, 2020).

Entre as vantagens inerentes aos processos enzimáticos, destacam-se sua segurança, o menor consumo de recursos naturais, como energia e água, bem como sua biodegradabilidade. O processo enzimático adota uma abordagem de processamento contínuo, resultando em uma redução substancial dos impactos ambientais. Dessa forma, a biotecnologia contribui para a preservação do meio ambiente em prol das gerações futuras (Shirvanimoghaddam *et al.*, 2020).

É plenamente viável estabelecer uma comparação entre a aplicação de rotas enzimáticas e o uso de agentes químicos convencionais em relação ao consumo de água e energia, dois recursos de elevada demanda no processo de preparação tradicional (Provin;

Cubas; Dutra, 2021). Essa preocupação é de alcance global, uma vez que o uso indiscriminado da água já provoca escassez em diversas regiões do planeta, devido a fatores como o aumento populacional, o aquecimento global, a concentração urbana e o crescimento da industrialização no setor têxtil, todos impactando o equilíbrio e a disponibilidade da água no mundo. Em contrapartida, a adoção de processos enzimáticos pode resultar em uma economia de até 40% desse recurso vital (Chaplin, Martin; Bucke, 1990), (Oliveira, 2020).

Ao adotar práticas sustentáveis, as empresas têxteis não apenas contribuem para a preservação do meio ambiente, mas também se posicionam de forma mais competitiva no mercado. Os consumidores estão cada vez mais conscientes e exigentes em relação à sustentabilidade, valorizando empresas que se preocupam com o futuro do planeta. Portanto, a implementação de processos sustentáveis na indústria têxtil é essencial para garantir um futuro mais sustentável e preservar os recursos naturais. A aplicação das rotas enzimáticas na indústria têxtil, não apenas beneficia o meio ambiente, mas também traz vantagens econômicas e fortalece a imagem da empresa no mercado global (Aggarwal; Dutta; Sheikh, 2020).

Diante dos elementos mencionados, a pressão do mercado e a crescente preocupação com o meio ambiente têm impulsionado o uso das rotas enzimáticas nos processos primários têxteis, evidenciando um significativo crescimento na aplicação das enzimas nesse contexto (Colombi, *et al.*, 2021). Torna-se, portanto, ainda mais evidente a importância deste estudo no âmbito da indústria têxtil, onde a adoção de rotas enzimáticas representa não apenas uma solução sustentável para minimizar os impactos ambientais, mas também uma estratégia competitiva para as empresas que buscam atender às demandas de consumidores conscientes e preocupados com a preservação do meio ambiente. No próximo capítulo, serão tratados em detalhes os objetivos deste trabalho, delineando a rota que será seguida para investigar mais profundamente os benefícios e desafios da aplicação de enzimas nos processos primários do beneficiamento têxtil.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo consiste em desenvolver um processo eficiente, economicamente viável e ecologicamente sustentável para substituir os métodos convencionais de preparação de tecidos de algodão. Isso será realizado nas etapas de biodesengomagem, biopurga e bioalveamento.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que serão abordados neste estudo incluem:

- a) Realizar estudos para determinar as condições adequadas de trabalho das enzimas,  $\alpha$  amilase, pectinase glucose oxidase (GOx) nas etapas de desengomagem, purga, e pré-alveamento, respectivamente, de forma isolada;
- b) Efetuar ensaios de preparação de tecido plano, incluindo as etapas de desengomagem, purga e alveamento em um único banho;
- c) Verificar as condições de trabalho ideais (concentração, temperatura e pH) de associações de enzimas para um processo de banho único para desengomagem, purga e alveamento.
- d) Avaliar os parâmetros de teor residual de amido, hidrofiliidade e grau de branqueamento do substrato após o tratamento enzimático, utilizando os métodos Tegewa, NBR 1300 e Datacolor 500.
- e) Realizar a tintura das amostras tratadas com enzimas usando diferentes concentrações de corante (0,25%, 0,50% e 1%) para avaliar as variações de cor em tecidos submetidos ao processo biotecnológico, comparando-os com a preparação convencional com agentes químicos.
- f) Efetuar uma análise comparativa de custos entre o processo enzimático e os métodos convencionais que utilizam agentes químicos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os processos enzimáticos têm se destacado como alternativas altamente promissoras na indústria têxtil, em substituição aos agentes químicos tradicionalmente empregados. A preparação do substrato de algodão, que compreende etapas cruciais como desengomagem, purga e pré-alvejamento, pode ser conduzida de maneira mais eficaz e ecologicamente sustentável por meio da aplicação de enzimas.

Nesta seção, será realizada uma revisão abrangente da literatura, explorando os processos empregados na preparação primária da indústria têxtil, com ênfase no substrato de algodão cru. Além disso, serão apresentadas informações essenciais sobre as enzimas  $\alpha$ -amilase, pectinase e glucose oxidase, que desempenham papéis fundamentais na biodesengomagem, biolimpeza e biobranqueamento do algodão.

### 2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil, por ser uma das atividades mais antigas desenvolvidas pelo ser humano, possui uma grande relevância social, cultural e econômica para muitos países, especialmente para aqueles em desenvolvimento. Ela desempenha uma posição estratégica em várias nações, uma vez que é responsável por uma parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB), gerando receitas e impulsionando a economia (Atkar *et al.*, 2021; Lobo; Limeira; Marques, 2014).

O mercado têxtil global foi avaliado em US\$ 993,6 bilhões em 2021 com Taxa de Crescimento Anual Composta, *Compound Annual Growth Rate* (CAGR), de 4,0% de 2022 a 2030. Espera-se que o crescimento do mercado durante o período de previsão seja impulsionado pelo crescimento do mercado eletrônico e a crescente demanda por vestuário da indústria da moda (Research, 2023).

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mostram que em Santa Catarina o setor têxtil responde por 26,7% da produção brasileira. Este crescimento é gerado pela qualidade e produtividade que a indústria catarinense vem alcançando. A indústria têxtil de Santa Catarina ultrapassou a de São Paulo em termos de produção. O estado produziu 26,75% de têxteis, o que representa R\$ 6,6 bilhões ao ano, em contrapartida São Paulo ficou com 22,57% da produção de roupas vestuário do país (R\$ 5,5 bilhões) (IBGE, 2022).

Além da sua importância econômica, a indústria têxtil também se destaca no ponto de vista ambiental devido ao elevado consumo de água e energia e geração de grandes quantidades de resíduos sólidos, líquidos e gasosos. De acordo com o estudo da *Forests for Fash* (Laspidou, *et al.*, 2020), a indústria têxtil e de confecções é responsável por 8 a 10 % das emissões globais de gases de efeito estufa e representa 20 % da poluição das águas residuais na Terra (Gusmão, 2008).

## 2.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO TÊXTIL

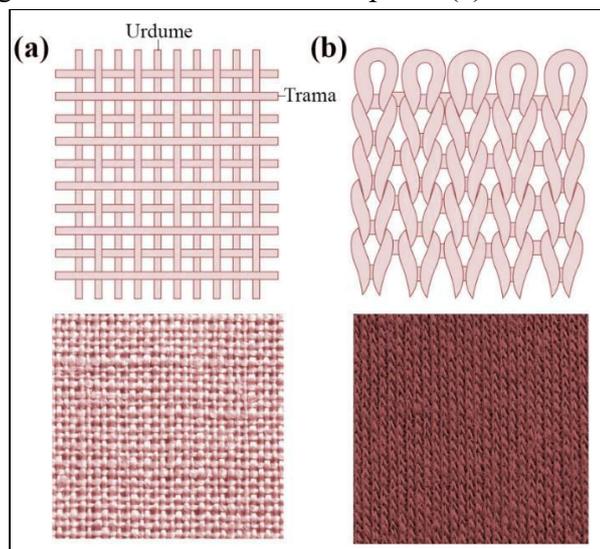
Os processos têxteis são divididos em cinco etapas: produção de fibras têxteis, processo de fiação (transforma fibras em fios), etapa de tecelagem (formação de tecidos e/ou malhas), processamento a úmido (preparação, tingimento e acabamento) e confecção do produto. Cada fase possui função de preparar o substrato à fase seguinte até que o produto final seja obtido (ABQCT, 2019).

Durante a produção de tecidos de algodão, as fibras são alinhadas, cardadas e fiadas para criar fios. Em seguida, esses fios são tecidos ou tricotados. A qualidade das fibras de algodão pode variar dependendo da variedade da planta, das condições de cultivo, do método de colheita e da forma como as fibras foram processadas (Negm, Mohamed; Sanad, 2020).

A etapa de fiação consiste na transformação das fibras do algodão em fios. Neste processo, as fibras passam pelos processos de abertura e limpeza, seguido da paralelização das fibras e afinamento da massa por meio da estiragem, recebendo a torção final que confere resistência ao fio (Negm, Mohamed; Sanad, 2020).

Na etapa seguinte, os fios são transformados em tecidos planos ou malhas, sendo a forma de entrelaçamento dos fios a diferença entre eles (conforme Figura 1). Nos tecidos planos, os fios se entrelaçam em ângulo reto (90°); os tecidos de malha são formados por laçadas, conforme mostra a Figura 1 (Negm, Mohamed; Sanad, 2020). Alguns exemplos de estrutura de tecido plano são os tafetás, sarjas cetins e outros. Já os exemplos de artigos de malhas são o tricô, moletom, Jersey, piquet.

Figura 1 - Estruturas de tecido plano (a) e malhas (b)



Fonte: Lima (2020)

Os processos têxteis a úmido podem ser divididos em três operações na etapa primária, que é responsável pela preparação do algodão para o tingimento. Essa fase inclui as etapas de desengomagem, limpeza e alvejamento (Besegatto *et al.*, 2018). A desengomagem, primeira etapa dos processos de beneficiamento em tecidos planos, envolve a aplicação de goma, geralmente de amido, nos fios de urdume antes da tecelagem, visando aumentar a resistência mecânica e reduzir o atrito entre os fios e as partes metálicas do tear (Besegatto *et al.*, 2018). No entanto, para garantir a hidrofiliabilidade do substrato nas etapas subsequentes, como limpeza, alvejamento e coloração, é essencial remover adequadamente essa goma (Besegatto *et al.*, 2018). A limpeza, também conhecida como “purga”, tem como objetivo eliminar graxas, ceras e pectinas naturais presentes nas camadas externas das fibras de algodão (Santos *et al.*, 2017). Quando necessário, o substrato segue para a etapa de alvejamento, que busca remover sujeira e a coloração caramelo claro natural das fibras, utilizando agentes surfactantes, peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), soda cáustica, sequestrantes, além de grandes volumes de água e energia (Shafie *et al.*, 2009). Após a conclusão dessas etapas de preparação, o substrato fica pronto para receber corantes, estampas ou acabamentos (Wulforth *et al.*, 2006).

A etapa secundária compreende em colorir ou tingir o substrato na cor desejada. A fase terciária consiste em fazer os acabamentos necessários para dar o aspecto final ao substrato como: estabilidade, maciez, ou incorporação de agentes como antiodor, essências aromáticas e outras funcionalidades (Monteriro, Valdirene; Silva, 2009).

Até a fase de tecelagem não são gerados grandes impactos ambientais, por se tratar de processos somente mecânicos, entretanto as etapas de beneficiamento representam o grande potencial poluidor. Além dos impactos ambientais, os processos químicos causam a despolimerização da celulose e reduzem a resistência da fibra (Twardokus, 2004).

Na busca por processos mais limpos, ecológicos e econômicos, aplicação de rotas enzimáticas tem se destacado. Além das enzimas serem moléculas biodegradáveis, produzidas por organismos vivos, elas atuam em condições brandas de temperatura e pH, são altamente específicas, o que causa menos danos ao tecido, dentre outras vantagens (Furlan, 2012).

Dependendo da forma como é executado o alvejamento, esta é a etapa mais agressiva a saúde e ao meio ambiente, pois esses são realizados em altas temperaturas (próximo a 100 °C), em presença de soda cáustica e agentes oxidantes, geralmente peróxidos (Santos; Barcellos; Piccoli, 2017). Em modelos existentes na literatura há descrição de uso de cloritos de sódio e permanganato de potássio, que exalam gases prejudiciais à saúde dos trabalhadores. Atualmente estes produtos químicos são pouco usados no alvejamento, somente em casos específicos (Sharma, Nirmal; Bhardwaj, Nishi; Singh, 2020).

As enzimas têm sido amplamente utilizadas em diversas indústrias, como farmacêutica, química, alimentos e bebidas, ração animal, higiene pessoal, entre outras (Besegatto, *et al.*, 2018). Na indústria têxtil elas podem ser utilizadas na desengomagem, purga, tingimento, biopolimento, bioestonagem, sendo as pectinases, amilases, celulasas e glicose oxidase as mais utilizadas (Choudhury, 2011).

### 2.3 FIBRAS TÊXTEIS

As fibras têxteis são os menores componentes pilosos encontrados em materiais têxteis e podem ser classificadas em dois grupos: naturais e químicas. As fibras naturais incluem fibras vegetais (como algodão, linho e rami), fibras animais (como lã e seda) e fibras minerais (como asbesto). Por outro lado, as fibras químicas são divididas em regeneradas e sintéticas. As fibras regeneradas são produzidas a partir de moléculas naturais, como a celulose obtida de madeira ou de algodão (como é o caso da viscose e do liocel). Já as fibras sintéticas são fabricadas a partir de polímeros derivados de monômeros petroquímicos, incluindo o poliéster, poliamida e poliuretano (Peets, *et al.*, 2016).

De acordo com o levantamento feito pela Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção ABIT (2022), a fibra de algodão é a mais consumida entre as fibras naturais. Esse

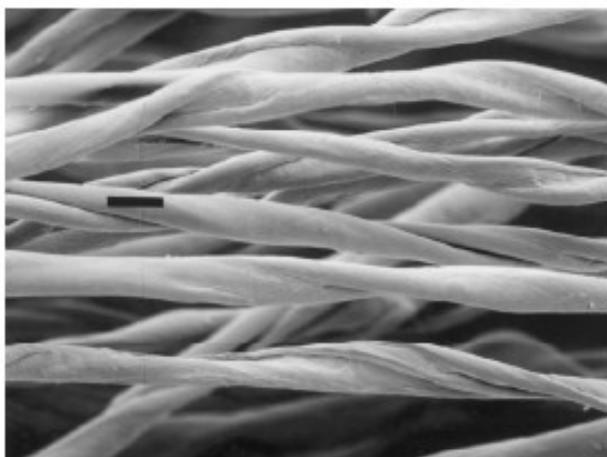
destaque está associado à versatilidade, excelente absorção de umidade, maciez, biodegradabilidade, boa resistência a agentes químicos e suas propriedades tintoriais (Legnaioli, 2017).

### 2.2.1 Algodão

As fibras de algodão são populares na indústria têxtil devido as propriedades, como maciez, conforto, resistência e absorção de umidade. Além disso, as fibras de algodão são biodegradáveis, o que as tornam uma opção mais sustentável do que outros materiais sintéticos (Perfeito, 2012).

A fibra de algodão quando madura e oca, exibindo uma morfologia bastante peculiar. Ela se apresenta em formas de fita torcida, com direções de torção ou convoluções que se invertem frequentemente ao longo das fibras (Kumar, 2015), conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Micrografia em sentido longitudinal da fibra de algodão madura



Fonte: Hsieh (2007)

Durante o desenvolvimento da planta até a colheita, formam-se camadas protetoras ao redor da fibra, compostos incluindo pigmentações amareladas, pectinas, ceras e graxas. Esses compostos naturais, considerados impurezas impactam os processos têxteis, principalmente os processos de tingimento e acabamento do tecido (Kumar, 2015).

A fibra do algodão é um material celulósico com maior pureza encontrado na natureza, em torno de 88 a 97% da composição é celulose e entre 4 a 12% de impurezas não celulósicas. Dentre as impurezas tem-se pectina, ceras, proteínas, flavonoides, açúcares, cinzas e outras

moléculas orgânicas que confere característica hidrofóbica, que auxiliam na sua proteção natural concentrada na porção mais externa da fibra. (Andreas *et al.*, 2019)

A fibra do algodão possui em sua composição química, materiais que interferem no beneficiamento têxtil. Os percentuais de materiais não celulósicos variam muito dependendo da região de plantio, do tipo de solo e da quantidade de umidade que a planta obteve durante sua formação (Melo, 2022). Essas informações podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Composição da fibra do algodão cru

<b>Composição da fibra</b>	<b>% na fibra crua seca</b>
Celulose	88 a 97
Sais inorgânicos	0,7 a 1,6
Proteínas	1 a 1,9
Ceras	0,4 a 1,2
Pectinas	0,4 a 1,2
Outros	0,5 a 8

Fonte: Adaptado de (Melo, 2022)

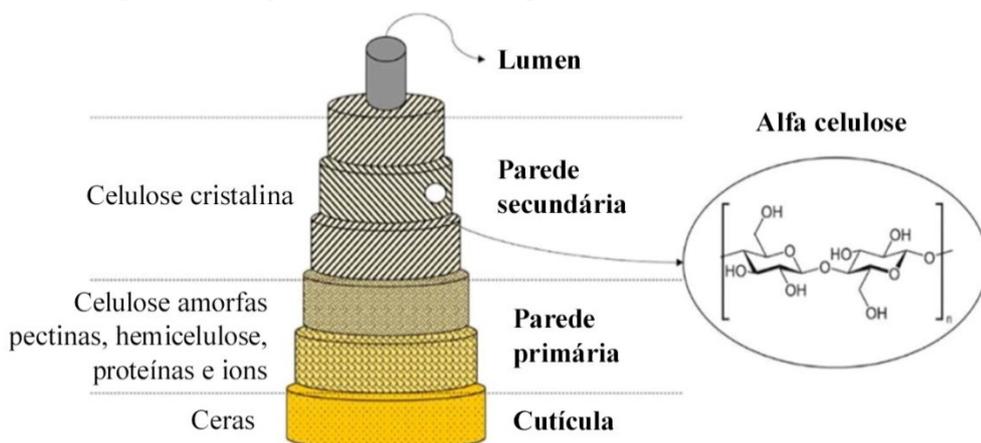
No entanto a fibra do algodão possui proteção externa da camada primária que são as ceras e pectinas, característica que a fibra possui maior concentração de material não celulósico e que deve ser retirado para que haja hidrofiliabilidade necessária nos processos têxteis (Dochia, M.; Sirghie, 2012).

A fibra de algodão é composta principalmente por celulose, um polímero natural de cadeia linear, que consiste em unidades repetidas de d-anidroglicopiranosose ligadas por ligações  $\beta$ - (1  $\rightarrow$  4). A celulose é um dos polímeros mais abundantes na natureza e é encontrada em muitas plantas, incluindo o algodão (Dochia, M.; Sirghie, 2012)(Nassima, Moussaoui; Nadjet, Mekaouche; Habiba, Fettati; Essma, 2017).

As fibras do algodão possuem parede fibrilar de forma organizada e é composta por três camadas distintas, conforme a Figura 3. Uma região interna ou lúmen, intermediária ou parede secundária e uma camada externa que é a parede primária. O lúmen é a parte oca da fibra. A parede secundária é composta por celulose semicristalina constituída de forma organizada que confere a resistência à tração da fibra. Enquanto a parede primária tem em sua constituição celulose disposta de forma desordenada e onde se encontra também pectinas e

proteínas. Revestindo a fibra tem-se a cutícula é uma camada fina e transparente que recobre a superfície da parede primária e é composta principalmente por ceras e graxas e pectina. (Colombi *et al.*, 2022).

Figura 3 - Esquema da fibra do algodão: estrutura e camadas



Fonte: Adaptado de Colombi *et al.* (2022)

O grau de polimerização (GP) da celulose no algodão pode variar de algumas centenas a várias dezenas de milhares de unidades de anidrocelulose. A anidrocelulose é a unidade de repetição da celulose no algodão, onde algumas partes são giradas em 180° em relação ao eixo da próxima cadeia. Essa torção é conhecida como torção de cadeia, e é uma característica única da estrutura da celulose no algodão (Perfeito, 2012).

Além da celulose, a fibra de algodão cru possui em sua estrutura compostos não celulósicos, como pectinas, óleos e graxas e proteínas que interferem na higroscopicidade da fibra. Esses compostos não celulósicos representam impurezas que irão impedir o processamento do algodão nas etapas de tingimento, estamparia e acabamento. Assim a remoção é executada no beneficiamento (Colombi *et al.*, 2022).

## 2.4 PROCESSOS TÊXTEIS

Os processos têxteis do algodão envolvem etapas que são realizadas em condições de ausência de água, os quais são processos de limpeza física e homogeneização das fibras, fiação e tecelagem.

As etapas realizadas com água estão nos processos de beneficiamento, que envolvem desengomagem, limpeza, branqueamento, tingimento e acabamentos. Neste trabalho será dado

maior ênfase aos processos primários do beneficiamento, sendo desengomagem, purga e alveijamento e o processo de tingimento com ênfase na avaliação da eficiência da preparação enzimática.

#### **2.4.1 Desengomagem**

A desengomagem é o processo de remoção dos agentes engomantes que são aplicados aos fios de urdume antes da tecelagem. Esses agentes engomantes ajudam a dar estabilidade e rigidez aos fios de algodão, o que facilita o processo de tecelagem. No entanto, esses agentes precisam ser removidos antes de se iniciar os processos de limpeza, purga e alveijamento do tecido, pois a presença residual desses agentes pode interferir na eficácia desses processos e levar a defeitos na aparência e na qualidade do tecido (Twardokus, 2004).

A desengomagem é um processo importante no beneficiamento de tecidos planos, pois tecidos com residual de solução engomante podem apresentar manchas e irregularidades na cor. Além disso, a presença de agentes engomante também pode afetar a absorção de corantes e outros produtos químicos, o que pode comprometer a qualidade do tecido (Gordon, S.; Hsieh, 2007).

A desengomagem convencional que utiliza agentes químicos como soda cáustica (NaOH), surfactantes e peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) pode ser um processo produtivo severo e consumir grandes quantidades de energia e água. Isso porque esses processos são realizados em altas temperaturas, muitas vezes próximas à temperatura de ebulição da água, o que requer grandes quantidades de energia para aquecer a solução. Além da água necessária para o enxágue para remover os resíduos dos agentes químicos (Toniolo, Zancan, Wust, 2015). O agente engomante mais utilizado é o amido, podendo ser de milho ou mandioca, por ser facilmente removido durante o processo de desengomagem através do uso das amilases e por ser biodegradável.

O amido de mandioca apresenta vantagens distintas em relação a outros tipos de amido. Quando empregado como espessante e agente de formação de goma, destaca-se pela sua notável viscosidade e aspecto translúcido (Demiate, 2015). No contexto do processo de desengomagem, a facilidade de hidrólise ou dissolução é uma característica essencial para o amido a ser utilizado.

Na composição das soluções de beneficiamento primário são incluídos os surfactantes ou tensoativos. Substâncias altamente versáteis e de grande importância na indústria têxtil. São

introduzidos para reduzir a tensão superficial, melhorando a molhabilidade dos substratos têxteis, além de atuarem como agentes de limpeza, dispersão e emulsificantes (Molter, 2021).

A presença dos compostos químicos presentes na solução de desengomagem aumenta a quantidade de carga poluidora a ser tratada na estação de tratamento de efluentes, os quais possuem características mais recalcitrantes e tóxicas, o que pode ser um processo dispendioso e complexo (Almeida, 2011).

Por essas razões, muitas empresas estão buscando alternativas mais sustentáveis para a desengomagem, como o uso de enzimas específicas para degradação dos agentes engomantes, que são mais suaves ao meio ambiente, consomem menos água e energia, e produzem menos resíduos poluentes. Além disso, a desengomagem enzimática pode melhorar a qualidade do tecido, reduzindo a probabilidade de manchas e irregularidades na cor (Ferrante, 2011).

#### **2.4.2 Purga**

A etapa de purga é um processo preparatório para ao pré-alvejamento, durante o qual são removidas as impurezas não celulósicas, incluindo a pectina, que é a principal substância não celulósica, assim como ceras, óleos e outros compostos que constituem uma camada protetora natural nas fibras de algodão. Essa etapa desempenha um papel fundamental, permitindo que os corantes possam ter acesso a celulose (Monteiro, 2010).

A purga alcalina normalmente é realizada em solução diluída de hidróxido de sódio (1 a 4%) durante 30 a 60 minutos, em pressão atmosférica normal. Para um bom resultado de limpeza, os trabalhos acontecem em condições de pressão e temperatura entre 75-100°C (Pimentel, 2010).

O processo convencional geralmente emprega agentes químicos, tais como surfactantes e hidróxido de sódio (NaOH), em temperaturas próximas ao ponto de ebulição. Este método resulta em perda de massa significativa e gera uma carga poluente substancial no tratamento de efluentes (March, 2005). Considerando os impactos associados ao processo convencional, as enzimas emergem como uma alternativa de grande relevância.

Neste sentido a remoção de impurezas não celulósica por meio de rotas enzimáticas se torna muito promissora, principalmente na retirada da pectina que é a principal substância não celulósica, ceras, óleos e outras, as quais formam uma camada protetora natural na fibra vegetal. Para ter acesso a celulose, a retirada desta camada é indispensável (Monteiro, 2010).

Além disso, a combinação de pectinase com celulase também se mostrou eficaz na biopurga do algodão. A celulase é uma enzima capaz de quebrar a celulose, outra substância presente nas paredes celulares das plantas, incluindo as fibras de algodão. Portanto, a combinação dessas duas enzimas ajuda a remover tanto a pectina quanto a cera das fibras de algodão, melhorando sua qualidade (Wang et al., 2007; (Pimentel, 2010).

Já no caso do algodão, a remoção da pectina, cera e agentes não celulósicos, é essencial para a obtenção de fibras puras e mais adequadas para tingimento. O uso das pectinases, junto com outras enzimas como amilases, lipases e hemicelulases, substitui o uso de soda cáustica, que é um produto químico nocivo ao meio ambiente. Além disso, esse processo enzimático consome menos energia, tornando-o mais sustentável (Gaio, 2016).

Para biolimpeza ou (biopurga), a enzima pectinase fornece todos os requisitos necessários para a obtenção da hidrofiliabilidade. As pectinases são grupos complexos de enzimas que executam a degradação de substâncias pécticas. Trabalha em temperatura ótima de limpeza entre 50 e 65 °C, com pH de 7,5 e 9,0, dependendo da classe da enzima (Mojsov, 2011).

Conforme mencionado por Monteiro (2009), as enzimas pectinases desempenham um papel essencial na indústria têxtil ao conduzir o processo de limpeza (purga). Esse processo tem por finalidade a remoção das camadas de pectina que envolvem as fibras de algodão durante as etapas de preparação das fibras naturais (Eren; Anis, 2009).

Estudos destacam a importância do controle de diversos parâmetros para otimizar o desempenho da enzima pectinase, incluindo aspectos como pH, concentração, tempo de processo e temperatura. De acordo com as descobertas de Colombi *et al* (2021), a concentração adequada da enzima geralmente varia entre 0,5% e 2%, enquanto a temperatura ideal se encontra na faixa 40°C e 60°C. Por outro lado, Işmal (2008) concluiu que ao empregar a pectinase na etapa de limpeza, obteve resultados superiores com uma temperatura de 55°C, mantendo o pH entre 5 e 9, dependendo da especificidade da enzima pectinase utilizada.

Em uma pesquisa conduzida por Sheikh, Javed e Bramhecha (2019), a enzima pectinase demonstrou influenciar o processo de preparação do substrato de algodão. Ao comparar os resultados com agentes químicos alcalinos, o pesquisador observou uma menor redução de massa do substrato, enquanto a hidrofiliabilidade permaneceu em níveis semelhantes.

O estudo conduzido por Borzani *et al.* (2005) empregou combinações de enzimas melhorando a eficácia no processo de biopurga. Os pesquisadores obtiveram resultados

superiores ao aplicar enzimas como pectinase, lipase e catalase, além de sequências de etapas do processo com diferentes enzimas de forma sucessiva.

A aplicação da biotecnologia permite a formulação de diversas misturas de enzimas para atender a aplicações específicas. Pesquisas conduzidas por Hauser (2011) sugerem que a combinação de pectinases com celulase na limpeza e biopolimento das fibras de algodão resultou em um substrato com maior umectação e superfície mais lisa.

Existem evidências de que a enzima celulase pode auxiliar na ação da pectinase, facilitando o acesso da enzima às pectinas do substrato têxtil de algodão. Essa combinação aprimora a remoção das impurezas não celulósicas e, ao mesmo tempo, não altera a estrutura celulósica do algodão (Beilen, Zhi, 2002). A utilização de pectinase em conjunto com celulase melhora significativamente a hidrofiliabilidade do substrato e reduz a quantidade de enzimas necessárias no processo (Hardin, 2010).

Pesquisas que empregaram a enzima pectinase obtiveram bons padrões de limpeza no substrato de algodão (Klein, et al., 2020) e relatam que a utilização de pectinase, lacase e peroxidase resultou em resultados semelhantes ou até superiores aos processos convencionais com agentes químicos (Andreaus, et al., 2019).

Dentre as pesquisas realizadas, Pimentel (2010) empregou uma pectinase alcalina, a pectato liase (E.C. 4.2.2.2), comercialmente conhecida como Bioprep 3000L da empresa Novozymes, cuja melhor atividade foi observada em pH 8,5 e temperatura de 55 °C. A adição do surfactante Quimerol 535 resultou em uma maior remoção das pectinas das fibras, melhorando o grau de limpeza, o que comprova que o uso dessa substância contribui para a otimização do processo.

No estudo de Reis (2016b), uma formulação de biopurga foi aplicada em malha de algodão com as seguintes características: pH 6,5, temperatura de 55 °C, tempo de 40 minutos, enzima celulase a uma concentração de 1,79 U/g em relação ao peso da malha, enzima pectinase a 0,118 U/g de malha, enzima lipase a 0,434 U/g de malha, sequestrante a 0,8 g/L e tensoativo a 1,5 g/L. Com essa formulação, o autor relata uma significativa limpeza do substrato têxtil, equivalente à obtida nos processos convencionais, mas com a vantagem de economia de água e energia.

### 2.4.3 Pré-alveijamento/alveijamento

O processo de alveijamento de tecidos tem como principal objetivo retirar as impurezas e pigmentos amarelados presentes no tecido cru, deixando-o com grau de branco necessário aos processos de beneficiamento secundário e terciário (Melo, 2022).

O principal objetivo de pré-alvejar um substrato é a subtração dos pigmentos caramelos da fibra do algodão, realçando a cor branca da celulose. O alveijamento do substrato de algodão pode ser realizado separado ou em conjunto com a purga no processamento a úmido dependendo da finalidade. Convencionalmente, para realizar um bom alveijamento, são necessárias grandes quantidades de energia e água para que o substrato finalize com um grau de alvura adequado (Pattanayak, 2020; Montaze Majid, 2018).

Dentro dos processos convencionais, o agente químico mais utilizado é o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) por permitir um alveijamento adequado sem causar amarelamento do substrato acabado no estoque (ABQCT, 2019). No entanto, se não controlar os parâmetros como pH, temperatura e tempo, o peróxido pode provocar diminuição da massa e diminuição da resistência do substrato (Oliveira; Moriyama; Vanderlei, 2018).

Além dos fatores poluentes dos efluentes, em que as descargas de água, caso não sejam devidamente tratadas, geram contaminantes nos mananciais, também são liberados vapores na atmosfera, provenientes da queima de combustíveis na geração de energia térmica, utilizada no aquecimento das soluções aquosas nas operações úmidas (Laspidou *et al.*, 2020).

Atualmente, as empresas do setor têxtil enfrentam uma intensa pressão por parte de entidades ambientais, legislações governamentais, tendências da moda e demandas dos consumidores finais, exigindo uma postura mais responsável em relação ao meio ambiente. Essa pressão decorre, em grande parte, dos passivos ambientais deixados para as gerações futuras, os quais não podem ser quantificados de forma imediata. A geração de poluentes, resultante do uso de agentes químicos, contribui para a degradação do meio ambiente de maneira insidiosa e não instantânea. O peróxido de hidrogênio, por si só, não causa poluição, mas durante o processo em que é empregado, transforma-se em um agente de degradação ambiental devido às elevadas temperaturas e ao consumo de água associado a esse processo (Nayark; Panwar; Nguyen, 2020).

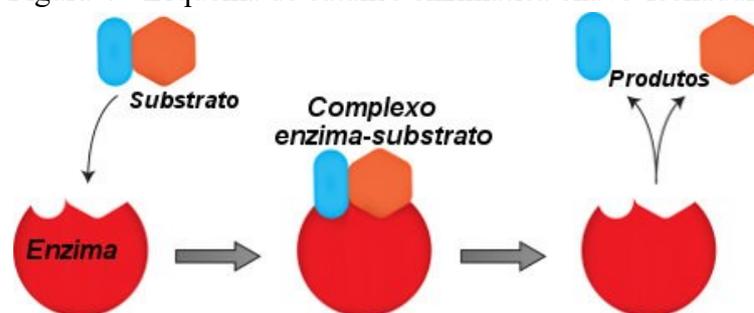
Nos últimos anos, tem havido uma busca por alternativas visando reduzir os impactos ambientais gerados pelo processo de alvejamento do algodão. Entre as alternativas mais estudadas e buscadas, destacam-se os ativadores de alvejamento baseados em enzimas, que permitem o branqueamento sem o uso de agentes químicos. A crescente demanda por enzimas por parte de algumas empresas nos últimos anos está relacionada ao fato de que essas substâncias são biocatalisadoras e biodegradáveis, atendendo aos princípios de respeito ao meio ambiente (Laspidou *et al.*, 2020).

## 2.5 ENZIMAS

As enzimas são biomoléculas capazes de catalisar reações bioquímicas em condições moderadas de pressão e temperatura, ou seja, são capazes de acelerar as reações através da diminuição da energia de ativação (Klein, et al., 2020), (Kozłowski; Róžańska, 2020), (Chibata, Tosa, Takamatsu, 1997).

As enzimas, com uma ampla gama de utilizações, são conhecidas por sua ação catalítica específica. De acordo com um modelo esquemático, cada enzima possui uma forma geométrica que é equivalente ao substrato, permitindo um encaixe perfeito como uma chave em uma fechadura (Motta, 2011). Esse mecanismo teórico é ilustrado na Figura 4. Essa especificidade na forma e função faz com que as enzimas sejam consideradas altamente específicas (Choudhury, 2014).

Figura 4 - Esquema de catalise enzimática chave-fechadura



Fonte: Klein, (2020)

A atividade da enzima está diretamente ligada a alguns parâmetros de ativação da reação/ação. Compreender estes parâmetros é assegurar um bom desempenho do processo, pois

o mecanismo enzimático e a velocidade das reações, acontecem de acordo com a teoria cinética das enzimas (Rahman *et al.*, 2020).

Variações de temperatura, pH e concentração das enzimas são fatores determinantes para o sucesso de um processo enzimático. Parâmetros não adequados à uma determinada enzima, leva ao estresse das ligações internas, quebrando as ligações iônicas e de hidrogênio da molécula proteica, alterando sua conformação e, conseqüentemente sua ação catalítica. Dessa forma, pode levar a uma atividade catalítica baixa, ou numa, caso ocorra a desnaturação ou inibição permanente (Sheikh; Bramhecha, 2019).

O conhecimento das características das enzimas e sua especificidade, é fundamental para o sucesso do processo industrial. As características do substrato em que a enzima atuará, fibra ou tecido, devem ser conhecidas para que as reações ocorram no tempo certo, principalmente quando esta acontece no processo primário onde acontece a limpeza da fibra, eliminando materiais não celulósicos, deixando a fibra hidrófila para os processos subsequentes (Sheikh; Bramhecha, 2019).

As enzimas, conhecidas há milhares de anos, ainda são subutilizadas e insuficientemente difundidas no setor têxtil, um mercado que tem experimentado crescimento substancial nos últimos anos. Avaliado em 10,6 bilhões de dólares em 2019, este mercado está previsto para crescer 7,1% entre 2020 e 2027. A dinâmica deste mercado é dominada e profundamente influenciada pela presença de um pequeno número de produtores, incluindo Novozymes, DuPont, Danisco e DSM, que juntos representam aproximadamente 75% das enzimas produzidas globalmente (Research, 2022).

Estudos recentes têm explorado as rotas enzimáticas que utilizam uma única solução aquosa para realizar processos simultâneos de biodesengomagem, biopolimento, biopurga e bioalveamento. Essa abordagem integrada permite a obtenção de um substrato alvejado com o grau de branqueamento adequado para os subsequentes processos de tinturaria e acabamento, com a vantagem de ser ecologicamente sustentável (Reis, 2016).

Dentro do campo do processamento de substrato têxtil de algodão, as celulases desempenham um papel fundamental. Essas enzimas são empregadas para remover as zonas amorfas das fibras ou fibrilas, em um processo conhecido como biopolimento, resultando em um substrato mais limpo e com menos fibrilas no plano do tecido (Alves, 2020).

A enzima glicose oxidase (GOx), específica na geração de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), facilita a remoção das pigmentações amareladas nas fibras de algodão. Esse processo

ocorre através da oxidação dos pigmentos, onde a enzima produz peróxido de hidrogênio de forma natural *in loco*. A quantidade de peróxido gerado varia conforme condições de trabalho como temperatura, tempo, pH e concentração de enzimas (Sheikh; Bramhecha, 2019).

### 2.5.1 Pectinase

As pectinases são enzimas pectinolíticas que têm a capacidade de degradar as substâncias pécicas e são produzidas por microrganismos presentes em vegetais. Essas enzimas desempenham um papel importante nos processos físico-químicos dos vegetais, o que as torna amplamente utilizadas na indústria de processamento de frutas. Além disso, as pectinases também são muito empregadas na indústria têxtil para a remoção da pectina presente nas fibras de algodão (Schiros et al., 2021).

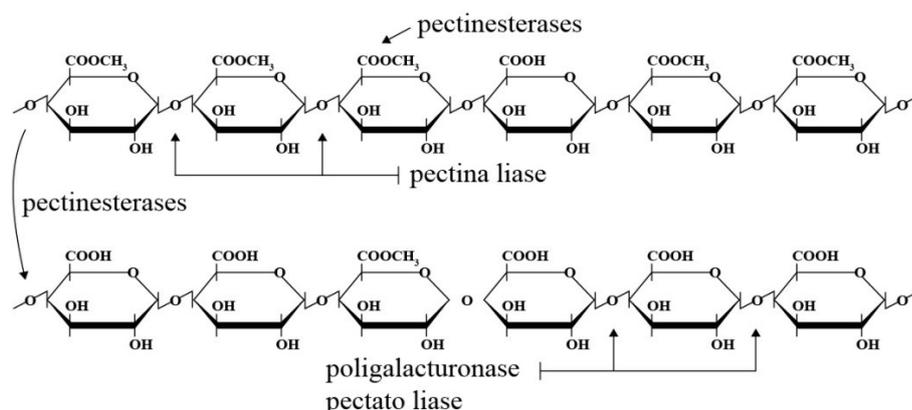
As pectinases podem ser categorizadas em três grupos principais, a saber: pectina esterase, responsável pela desesterificação ou desmetoxilação, removendo os grupos metil éster; as despolimerizantes, que englobam as enzimas hidrolíticas e as liases, catalisando a quebra das ligações glicosídicas nas substâncias; e as protopectinases, que solubilizam a protopectina para formar pectina, catalisando a quebra das ligações  $\alpha$ -1,4 na cadeia principal do polissacarídeo pécico, e a desmetoxilante desesterifica a pectina em ácido pécico, removendo os resíduos de metoxila (Uenojo, 2007).

Estas enzimas pectinolíticas são utilizadas na indústria têxtil como agente de degradação da camada de pectina que envolve as fibras de algodão, limpando as fibras para processamentos posteriores (Reis, 2016).

As pectinases alcalinas também são utilizadas no processo de maceração das fibras extraídas do caule, tais como linho, cânhamo e juta, na biopreparação de algodão e no biopolimento enzimático de misturas em tecidos algodão/juta (Uenojo, 2007).

As enzimas são classificadas pela atuação na cadeia química do ácido galacturônico e na dos polímeros pécicos. Para tanto, os três tipos de enzimas mais comuns são: despolimerizantes (hidrolases e liases), protopectinases e as desesterificantes (pectinesterases) (Anand et al., 2020). São classificadas pela atuação com o substrato (pectina ou pectato), ou seja, o local em que atua na molécula, podendo atuar de forma aleatória (endo) ou nas extremidades reductoras, (exo), conforme Figura 5.

Figura 5 - Atuação das pectinases na molécula de pectina



Fonte: Pooja Kohli (2015)

São classificadas e nomeadas conforme a "Enzyme Commission" (EC), segundo as recomendações da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry* ou União Internacional de Química Pura e Aplicada), conforme Quadro 2.

Na indústria têxtil, as enzimas pectinolíticas são usadas na degradação da camada de pectina, que se situa na parte externa da fibra formando uma camada protetora da celulose proporcionando acesso a celulose da fibra. A pectinase alcalina muito usada na maceração de fibras do linho, juta e outras. No processamento a úmido do algodão, a pectinase com amilase, lipase e hemicelulase proporcionam a limpeza de ceras, gomas e pectinas, substituindo o uso de agentes químicos como soda cáustica, melhorando a qualidade do substrato gastando menos energia (Uenojo, 2007).

Quadro 2 - Classificação da enzima pectica

Tipo de enzima	Nome EC	Sigla	Nome comum	Número EC
Desesterificante Hidrolase	Polimetilgalactulonase	PMGE	Pectina esterase	3.1.1.1.1
	endo poligacturonase	endo-PG	Poligacturonase	3.2.1.1.5
	exo poligacturonase 1	exo-PG1	Poligacturonase	3.2.1.67
	exo poligacturonase 2	exo-PG2	Poligacturonase	3.2.1.82
	endo polimetilgacturonase	endo-PMG	Pectina hidrolase	
	exo polimetilgacturonase	exo-PMG	Pectina hidrolase	
Liase	endo poligacturonase liase	endo-PGL exo-PGL	Pectato liase	4.2.2.2
	exo poligacturonase liase	endo-PMGL	Pectato liase	4.2.2.9
	endo polimetilgacturonase liase		Pectato liase	4.2.2.10
	exo polimetilgacturonase liase	exo-PMGL	Pectato liase	

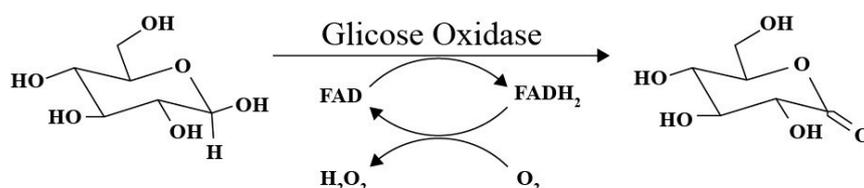
Fonte: Adaptado de Uenojo (2007)

## 2.5.2 Glicose Oxidase

A glicose oxidase (GOx) é utilizada para geração de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), que proporciona oxidação das pigmentações amareladas existentes nas fibras do algodão. A quantidade de peróxido gerado depende das condições de trabalho como temperatura, tempo, pH e concentração de enzimas (Sheikh; Bramhecha, 2019).

A enzima glicose oxidase ( $\beta$ -D-glicose: oxigênio 1-oxidoreductase; EC 1.1.2.3.4) (GOx) realiza a catálise e oxidação de  $\beta$ -D-glicose em ácido glucônico, para isto utiliza o oxigênio molecular como receptor de elétrons, formando peróxido de hidrogênio de forma espontânea (Bankar *et al.*, 2009). A reação ocorre em duas etapas, uma redutora e outra oxidativa. Na fase redutora a GOx catalisa a oxidação de  $\beta$ -D-glicose para D-glicono- $\delta$ -lactona, formando o ácido glicoônico através da enzima. A flavina dinucleotídeo adenina (FAD), presente no anel da GOx é formada através da redução em  $FADH_2$  (FAROOQ *et al.*, 2013). Na fase oxidativa a enzima GOx é reduzida e posteriormente oxidada através do oxigênio na produção do  $H_2O_2$ . O peróxido de hidrogênio é inclinado a produzir água e oxigênio através da catálise da enzima (Bankar *et al.*, 2009). A Figura 6 representa a reação de oxidação da glicose pela GOx.

Figura 6 - Reação da oxidação da glicose pela GOx



Fonte: Adaptado de (Sousa, 2017)

Esta enzima pode ser inibida na presença de metais micromolares, chumbo, prata e mercúrio.

A atividade catalítica das enzimas pode ser influenciada pela presença de surfactantes iônicos, como o SDS e o brometo hexadeciltrimetilamônio. Observa-se que surfactantes aniônicos tendem a afetar a atividade enzimática em pH abaixo de 6, enquanto os catiônicos têm impacto relevante em pH acima de 9, o que pode resultar na inativação da enzima glicose

oxidase. Além disso, temperaturas superiores a 40°C podem ocasionar uma redução ou cessação da atividade enzimática (Chaplin, Martin; Bucke, 1990).

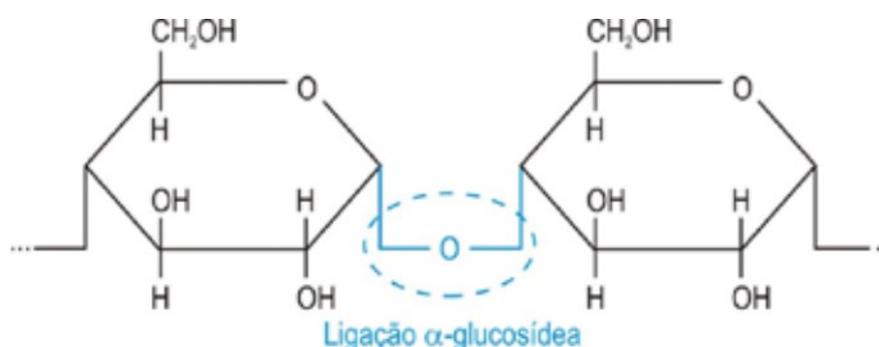
### 2.5.3 Alfa amilase

As amilases hidrolisam as moléculas de amido, importante polissacarídeo dos vegetais, constituído por 25 a 30% de amilose e 75 a 70% de amilopectina. A amilose é um polímero linear em torno de 6.000 unidades de glicose, com ligações glicosídeas do tipo  $\alpha$ -1-4. As cadeias da amilopectina possuem entre 15 e 45 unidades de glicose formando ligação  $\alpha$ -1,6 na cadeia de amilase (Furlan, 2012).

As  $\alpha$ -amilases atuam aleatoriamente no interior da cadeia de amido, quebrando os carboidratos de cadeia longa em maltose, que pode originar-se tanto da amilose quanto da amilopectina. Devido à sua capacidade de atuar de forma aleatória no substrato, a  $\alpha$ -amilase geralmente apresenta uma ação mais rápida do que a  $\beta$ -amilase. É por isso que a  $\alpha$ -amilase é amplamente empregada na desengomagem de materiais têxteis, onde quebra as ligações glicosídicas presentes nas gomas, conforme ilustrado na Figura 7. As  $\alpha$ -amilases são tipicamente utilizadas em condições que envolvem um pH entre 5,5 e 7,0, juntamente com uma temperatura variando de 25 a 55 °C (Choudhury, 2019).

A vantagem desta enzima amilase em relação aos processos químicos, executa as reações na remoção dos amidos sem danificar as fibras. Utilizada na remoção em temperaturas entre 30 e 60 °C, com pH em torno de 6 (Mojsov, 2011).

Figura 7 - Ligação alfa-glucosídica no amido



Fonte: Adaptado de Bezerra *et al.* (2015)

### 2.5.4 Enzima Peroxidase

As peroxidases são capazes de catalisar a reação do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), tendo água ( $H_2O$ ) como subproduto. Essa ação promove a eliminação do peróxido da solução aquosa, evitando o amarelamento do substrato de algodão durante o armazenamento (Kamimura, 2006).

A enzima peroxidase (POD), uma oxidoreductase, tem a capacidade de catalisar uma variedade de reações oxidativas em condições adequadas com o peróxido de hidrogênio e o substrato, podendo ainda utilizar o oxigênio como receptor de hidrogênio (Freitas et al, 2008).

Em uma pesquisa recente, foram identificados os parâmetros ideais de temperatura e pH para trabalhar com as enzimas lignina peroxidase (LiP) e álcool arílico oxidase (AAO). A temperatura ideal neste sistema foi determinada em 50 °C, permitindo que ambas as enzimas atuassem eficientemente. Quanto ao pH, observou-se que a melhor potencialidade ocorreu na faixa de 6,0 a 7,0 (Ferrante, 2011).

É importante enfatizar que cada enzima tem seu próprio pH ideal, e desvios desses valores podem comprometer a eficácia da mesma. Por exemplo, a LiP apresentou desempenho superior na faixa de pH 5,0 a 6,0, enquanto a enzima AAO atingiu sua atividade ótima na faixa de pH 6,0 a 7,0. Quando ambas as enzimas foram utilizadas em conjunto, o resultado mais eficaz foi obtido em pH 6,0, o que resultou em uma atividade enzimática excelente na conversão da lignina (Liu *et al.*, 2021).

## 2.6 ENZIMAS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

O uso de enzimas na indústria têxtil teve início em 1857, quando se utilizava o malte na remoção do amido aplicado antes da fase de tecimento. Atualmente, as enzimas são amplamente utilizadas em diversos processos, como pré-tratamento de substratos têxteis, desengomagem, limpeza e alvejamento de fibras celulósicas (Choudhury, 2011).

A aplicação de enzimas na indústria têxtil tem sido vista como uma alternativa aos processos químicos convencionais, pois elas minimizam os impactos ambientais por atuarem em temperaturas moderadas, pH próximo do neutro e serem biodegradáveis. Além disso, não alteram as propriedades das fibras devido a sua elevada especificidade (Verret, 1991; Cooper, 1993; Hack-Polay *et al.*, 2020; Rahman *et al.*, 2020; Shen; Smith, 2015; Shen, 2009). Embora

ofereça diversas vantagens, as enzimas também possuem algumas desvantagens. O Quadro 3 apresenta as vantagens e desvantagens do uso de enzimas nos processos têxteis.

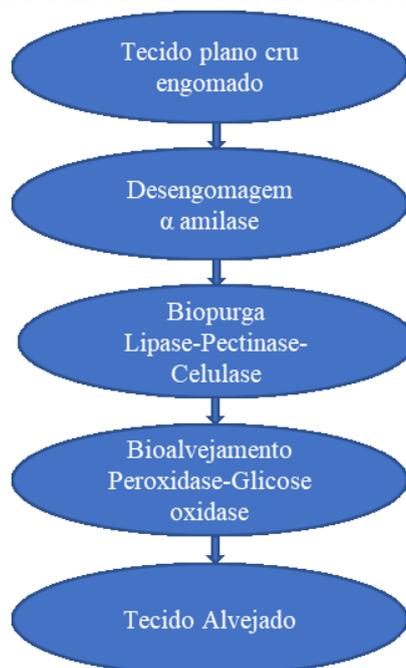
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do uso de enzimas nos processos têxteis

Vantagens	Desvantagens
Possuem reações catalíticas mais rápidas e extensas em relação a agentes químicos	Necessidade de maior controle de pH e temperatura do processo
Reações ocorrem em temperaturas moderadas (40°C a 80°C), em pH neutro	Enzimas se desnaturam ao trabalhar fora da faixa de pH e temperatura, tornando-se inutilizáveis (exceto enzimas termoestáveis)
As enzimas possuem biodegradabilidade, resultando em menor impacto ambiental	Alguns álcalis, surfactantes, antissépticos e agentes de liberação de ácido podem reduzir ou acabar com a atividade enzimática
As enzimas possuem alta especificidade de reações e formam subprodutos no processo	Algumas enzimas podem causar irritação (pele e olhos) e alergias respiratórias

Fonte: Adaptado de Reis (2016)

As enzimas podem ser empregadas em processos de beneficiamento úmido, conforme pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Processos e fases utilizando atividade enzimática



Fonte: Adaptado de Reis (2016)

O uso de enzimas nos processamentos têxteis desempenha um papel significativo na redução da poluição gerada. Suas características específicas em relação ao substrato permitem um processo mais eficiente em comparação ao uso de agentes químicos, com condições moderadas de temperatura e pH. Isso resulta em uma maior economia, melhoria na qualidade do produto e do processo, redução da perda de massa das fibras e melhoria da hidrofiliidade (Choudhury, 2019). As enzimas são utilizadas na remoção de componentes não celulósicos das fibras de algodão, como na desengomagem, biopolimento, purga (bioscouring) e alvejamento. Cada enzima apresenta especificidade em relação a cada região da fibra, além de contribuir para a melhoria da qualidade da estação de tratamento de efluentes, mitigando os impactos ambientais (Ferrante, 2011).

Os processos industriais têxteis adotam o uso de enzimas, proporcionando uma vantagem significativa em relação aos agentes químicos, pois não alteram as propriedades das fibras, reduzindo impacto negativo no meio ambiente, formando assim um ciclo sustentável. Nos últimos anos, houve um aumento na conscientização ambiental, o que resultou no desenvolvimento de pesquisas sobre a aplicabilidade das enzimas nos processos de beneficiamento têxtil, principalmente na remoção de impurezas não celulósicas, conhecida como biopreparação ou purga enzimática. Essa abordagem traz inúmeros benefícios, especialmente no aspecto ecológico do processo, substituindo agentes químicos convencionais (Monteiro e Silva, 2009).

A eficácia da implementação de tecnologias enzimáticas na indústria têxtil já foi amplamente demonstrada, oferecendo notáveis benefícios e abrindo novas oportunidades estratégicas (Rahman *et al.*, 2020). As enzimas, originárias da atividade biológica de organismos vivos, aceleram reações químicas em temperaturas moderadas e em um pH próximo do neutro (Rahman *et al.*, 2020). Elas apresentam características singulares, com alta especificidade em relação aos substratos, e são de natureza proteica e biodegradável (Shen, Smith, 2015). Além disso, demonstram notável capacidade de adaptação e especificidade quando aplicadas em processos têxteis, sem desencadear efeitos indesejados (Meneses, 2021). As enzimas disponíveis no mercado podem ser obtidas de microrganismos, plantas e animais, e sua classificação se baseia no tipo de reação catalítica que desempenham, incluindo oxidorreduções, transferases, hidrolases, liases, isomerases e ligases (Choudhury, 2014; Rahmana *et al.*, 2020).

A transformação da indústria têxtil em uma indústria sustentável apresenta desafios significativos. No entanto, o uso de enzimas como biocatalisadores nos processos têxteis tem se destacado como uma das alternativas viáveis. A utilização de enzimas como a alfa amilase para a remoção de amidos, a glicose oxidase (GOx), a lacase, a celulase e a pectinase para a limpeza e bioalvejamento tem sido explorada como substitutos naturais aos agentes químicos, contribuindo para tornar a indústria têxtil mais sustentável, como ilustrado no ciclo apresentado na Figura 9. Pesquisas recentes têm demonstrado resultados promissores nesse sentido (Tochetto *et al.*, 2022).

Devido à sua natureza proteica, as enzimas desempenham o papel de catalisadoras em reações químicas, acelerando a velocidade das reações e reduzindo a energia de ativação necessária para iniciá-las, o que permite a substituição de agentes químicos. Especificamente, as enzimas microbianas apresentam vantagens significativas devido à sua estabilidade e alta atividade catalítica, resultando em um desempenho excelente e eficiente, especialmente em substratos têxteis (Oliveira *et al.*, 2021).

Figura 9 - Ciclo de aplicação enzimática



Fonte: Adaptado de Tochetto *et al.*, (2022)

Neste contexto, é possível utilizar métodos biotecnológicos no processamento têxtil durante a fase úmida, visando minimizar os impactos ambientais e promover a saúde dos trabalhadores. Uma abordagem promissora é o uso de enzimas como catalisadores bioquímicos durante as etapas primárias do beneficiamento. As enzimas apresentam diversas vantagens em comparação aos agentes químicos tradicionalmente empregados nesse processo. No entanto,

também há algumas desvantagens associadas à sua aplicação (Reis, 2016), conforme já apresentado no Quadro 3.

A utilização de enzimas na indústria têxtil tem se tornado cada vez mais relevante devido aos avanços tecnológicos alcançados nos últimos anos, possibilitando a adoção de processos ambientalmente sustentáveis, resultando em melhorias tanto na qualidade dos produtos quanto na preservação do meio ambiente. As regulamentações ambientais estabelecidas pelos países produtores de têxteis e moda têm impulsionado a aplicação da biotecnologia em produtos e serviços do setor industrial (Rahman *et al.*, 2020; Aly; Moustafa; Hebeish, 2004).

O emprego de processos biotecnológicos na indústria têxtil tem ganhado destaque devido à redução dos custos das enzimas, que estão se tornando mais competitivas em comparação aos agentes químicos utilizados nos processos convencionais. Além disso, os estudos que avaliam a viabilidade do uso de enzimas nesse contexto têm avançado significativamente, com várias pesquisas demonstrando resultados promissores em diversas etapas dos processos têxteis (Schiros *et al.*, 2021).

A formação de pilosidade nos tecidos, especialmente aqueles produzidos com fibras de algodão, pode ocorrer devido ao atrito. A enzima celulase é usada para retirar estas fibrilas sobrepostas na superfície que posteriormente provocam o *pilling*, e a aplicação desta enzima proporciona um tecido com melhor brilho e tato (Stéphanie *et al.*, 2018). Além disso, a enzima celulase é amplamente empregada no processo de desbotamento de peças de tecido denim, proporcionando um efeito envelhecido, efeito *Stone Washed* sem que haja o desgaste, além da reprodutibilidade do processo em relação ao executado de forma convencional feito com pedras pomes (Christie, 2007).

Na fase de preparação existem três enzimas básicas que são usadas e estudadas na desengomagem, limpeza e pré-alvejamento do substrato de algodão, conforme Quadro 4.

Quadro 4 - Enzimas utilizadas na fase de preparação do algodão

PROCESSO	ENZIMA	FUNÇÃO DA ENZIMA
Desengomagem	Amilase	Hidrolisar amido, quebrar carboidratos de cadeia longa
Purga	Celulase, pectinase	Limpar gorduras, óleos
Alvejamento	Glicose oxidase e lacase	Eliminar pigmentações amareladas da fibra

Fonte: Adaptado de Sheikh; Bramhecha (2019).

### 2.6.1 Biodesengomagem enzimática

Na biodesengomagem enzimática, a enzima  $\alpha$ -amilase desempenha um papel fundamental. Esta enzima atua modificando o amido, convertendo-o em açúcares de menor massa molecular, tornando-o solúvel em água e, assim, facilitando a remoção completa do amido da superfície das fibras. Uma vantagem significativa desta abordagem é que a ação da  $\alpha$ -amilase é restrita às ligações alfa-glucosídicas (ligações  $\alpha$ -1-4), o que resulta na dissolução da goma, seja em seu estado natural ou modificado, em substâncias solúveis, sem causar danos ao substrato (Bezerra *et al.*, 2015). De acordo com Rahmana *et al* (2020), no contexto dos processos têxteis, as enzimas  $\alpha$ -amilases reagem de forma mais rápida do que as  $\beta$ -amilases, atuando de maneira aleatória na cadeia de amido. Portanto, as  $\alpha$ -amilases são as mais amplamente utilizadas no processo de biodesengomagem de substratos de algodão engomado.

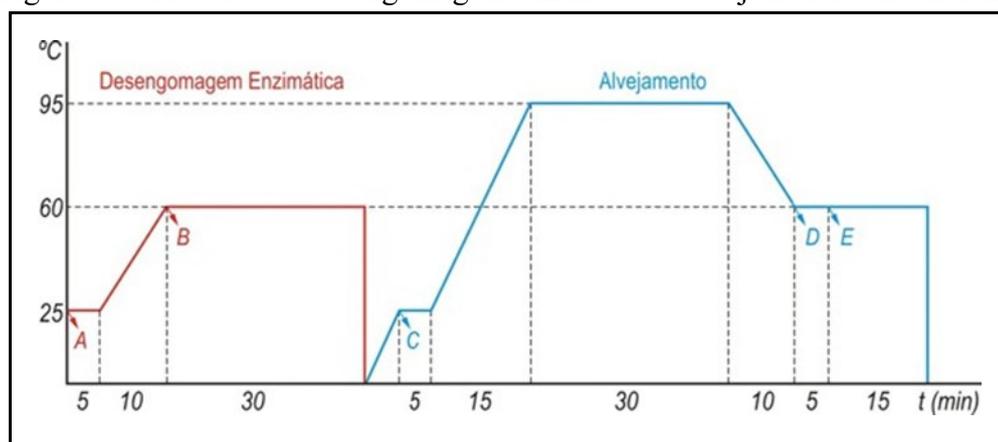
Na biodesengomagem, as  $\alpha$ -amilases mais comumente utilizadas têm origem bacteriana, sendo produzidas por microrganismos como *Bacillus amyloliquefaciens* e *Bacillus subtilis*. Estas enzimas se destacam por sua atividade eficaz em temperaturas que variam de 50 e 80 °C e faixa de pH entre 6 e 7. No entanto, é importante ressaltar que esse tipo de enzima é altamente sensível às variações de pH. (Monteiro; Silva, 2009).

A biodesengomagem realizada por hidrólise enzimática necessita ter atenção na manutenção da atividade da enzima. A fim de diminuir ou evitar a desnaturação da enzima, recomenda-se colocar a água primeiro e aquecer a temperatura recomendada, acertar o pH neutro e somente depois adicionar a enzima amilase (Ferrante, 2011).

É importante ressaltar que a enzima amilase bacteriana apresenta as melhores propriedades na retirada da goma, mas possui um maior custo em relação às outras amilases.

Furlan (2012) executou a biodesengomagem, com a enzima comercial Biokey DSK, uma  $\alpha$ -amilase E.C.3.2.1.1, da empresa Novozymes, na condição de pH entre 5 e 7 e temperatura entre 50 a 110 °C, obtendo resultados superior ao processo químico. Na Figura 10 está uma proposta de realização de processo enzimático de biodesengomagem seguido de um alveijamento convencional com agentes químicos.

Figura 10 - Processo de desengomagem enzimática e alveijamento convencional



Fonte: Adaptado de Bezerra *et al.* (2015)

Bezerra *et al.* (2015), realizando a desengomagem enzimática e alveijamento químico simultâneo, utilizou da seguinte formulação: 1,0 g.L<sup>-1</sup> de detergente (A) e 0,5 g.L<sup>-1</sup> de  $\alpha$ -amilase (B) para a desengomagem; 1,0 g.L<sup>-1</sup> de detergente (C); 1,0 g.L<sup>-1</sup> de sequestrante (C); 0,2 g.L<sup>-1</sup> de Na<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (C); 1,0 mL.L<sup>-1</sup> de NaOH 50 °Bé (C); 1,0 mL.L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (C); 0,5 mL.L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (D) e 0,5 g.L<sup>-1</sup> de catalase (E) para o alveijamento. A implementação prática desse processo pode ser visualizada na Figura 10. Como resultado, observou-se um aumento na capilaridade em comparação com o processo químico, com um incremento de aproximadamente 1,3 cm, porém com uma redução no grau de alvura.

## 2.6.2 Bioalveijamento

O clareamento ou branqueamento de substrato de algodão, no decorrer da história foi executado de forma redutiva ou oxidativa, com agentes químicos agressivos a fibra e ao meio ambiente. Portanto, a introdução do bioalveijamento na indústria têxtil é a forma de garantir um futuro no vestuário e moda de maneira sustentável.

Diante da problemática envolvendo o alveijamento convencional com agentes químicos com grande potencial poluidor e as pressões de mercado, uma solução alternativa é trabalhar com enzimas apropriadas para este fim. Segundo Monteiro e Silva (2009), grande parte das reações químicas podem ser alteradas para catálises enzimáticas, pois sua velocidade de reação é superior aos produtos químicos.

O bioalveijamento ou branqueamento enzimático utilizando as enzimas lacase, glicose oxidase e peroxidase, executam o alveijamento pela produção de parácidos *in situ* e gerando  $H_2O_2$  (Kozłowski; Róžańska, 2020).

Enzimas extracelulares possuem em sua formulação multicobres agindo na oxidação usando o oxigênio existente na molécula, oxidando os fenóis e demais compostos aromáticos existentes no substrato, através de uma reação de substituição de radicais em ação/reação. A ação da lacase abrange uma grande quantidade de substrato que ela consegue atuar, mostrando que ela não possui uma grande especificidade (Lima, 2020), (Choudhury, 2019).

Segundo Farooq *et al.* (2013) outras enzimas podem substituir a utilização do peróxido de hidrogênio no processo de alveijamento do algodão, e sim substituir pelo alveijamento enzimático, onde o  $H_2O_2$  seja produzido *in situ* pela catálise da enzima glicose oxidase.

Segundo (Halim, Abdel; Al-Deyab, 2013), o alveijamento de forma contínua, ou seja, desengomagem, purga e pré-alveijamento em uma única solução aquosa, é ambientalmente melhor, mais sustentável e econômico em relação ao processo convencional com agentes químicos, método que integra as etapas desde a preparação ao pré-alveijamento antecedendo a tinturaria.

Ao realizar estudos comparativos entre o pré-alveijamento convencional e processos empregando a enzima glicose oxidase, verificou-se uma notável melhoria no grau de brancura quando se utilizaram enzimas. Especificamente, os resultados demonstraram que, no processo enzimático, foram obtidos valores de 50 e 58 graus Berger, em contraste com 44 e 47 graus no pré-alveijamento convencional. Esses resultados ressaltam a viabilidade dos processos de pré-alveijamento com enzimas, os quais demandam menos consumo de energia e água. Além disso, apresentam a vantagem de serem ambientalmente mais sustentáveis (Usluoglu, Arabaci, 2014).

O processo de preparação do substrato de algodão em uma única solução aquosa, tem por intenção utilizar a goma para produção de unidades de glicose a partir do amido nela contido, auxiliando a enzima GOx na biogeração de peróxido de hidrogênio (Tznov *et al.*, 2001).

Quando a  $\beta$ -glicose oxidada se converte em ácido glucônico, por meio da transferência de dois elétrons do substrato, conforme destacado por Bankar *et al.* (2009), ocorre a produção de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ). Este peróxido de hidrogênio demonstra a capacidade de atuar como agente alvejante, promovendo a dissolução dos constituintes de coloração presentes no algodão, bem como de outros componentes não celulósicos. Além disso, a formação de ácido glucônico por meio da oxidação da  $\beta$ -d-glicose também atua como um catalisador de íons metálicos. Para evitar esse efeito, biocatalizadores, como o estabilizador TEAED, são empregados, conforme mencionado por Tzanov *et al.* (2002).

O processo de bioalvejamento em substrato de algodão, que envolve a produção *in situ* de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) por meio da ação da glicose oxidase (GOx), foi abordado por Tzanov *et al.* (2002) e também por Eren e Anis (2009). Os resultados obtidos demonstraram ser comparáveis aos alvejamentos convencionais. Durante o processo de bioalvejamento com GOx, alguns parâmetros cruciais foram identificados, incluindo o tempo de aeração, uma vez que a introdução de oxigênio melhorou a formação de  $H_2O_2$ , bem como o pH e a temperatura. Vale ressaltar que a produção mais significativa de  $H_2O_2$  ocorreu durante a aeração, em oposição à agitação mecânica mais intensa.

Inicialmente, observou-se que o índice de alvura no substrato aumentou consideravelmente com o aumento da quantidade de glicose, porém, em um estágio subsequente, diminuiu significativamente devido à redução na geração de  $H_2O_2$  (Tzanov *et al.*, 2001). A remoção da coloração acastanhada do substrato de algodão foi documentada por Shin *et al.* (2004) durante um processo de pré-alvejamento enzimático utilizando glicose oxidase, que permaneceu ativa após a etapa de biodesengomagem. Além disso, Farooq *et al.* (2013) constataram que o aumento da concentração de GOx, juntamente com o aumento do tempo de processo, resultou em melhorias significativas na eliminação da coloração caramelo do algodão.

O bioalvejamento com glicose oxidase em substrato de algodão age por meio da reação de gluconolactona, flavoproprodimérico glicosiadoteína, que facilita a produção de ácido glucônico e  $H_2O_2$  como um subproduto. Obtendo benefício duplo, ou seja, a solução aquosa da desengomagem e lavagem, onde já possui o subproduto glicose produzida durante este processo, sendo um potencial gerador de peróxido de hidrogênio regenerado no bioalvejamento do algodão. Ao utilizar a glicose oxidase na execução do bioalvejamento em uma única solução, envolvendo biodesengomagem, biopurga e bioalvejamento, o amido disperso no banho é um acelerador do branqueamento, que após hidrolisado com auxílio das enzimas  $\alpha$ -amilase e

glucoamilase e formando glicose auxilia na produção de  $H_2O_2$ , resultando em grau de branco próximo ao processo convencional (agentes químicos) (Sheikh; Bramhecha, 2019).

Hebeish *et al.* (2009) empregaram uma abordagem combinada de biopurga e bioalvejamento em substrato de algodão, utilizando ácido peracético gerado in situ por meio do tetracetililenodiamina (TAED) e  $H_2O_2$ . O estudo envolveu a preparação em solução aquosa única para a biolimpeza (purga) e o biobranqueamento, realizados a 60 °C e pH 8 durante 60 minutos. Os resultados mais promissores em termos de absorção de água e grau de brancura, foram obtidos quando se utilizou a enzima pectinase alcalina (2 g/L), Tetracetililenodiamina TAED (15 g/L),  $H_2O_2$  (5 g/L), agente umectante (0,5 g/L) e silicato de sódio (2 g/L). Além disso, o substrato apresentou melhorias em relação à perda de massa e resistência à tração, evidenciando que as enzimas podem desempenhar um papel significativo e apropriado nos processos úmidos têxteis. O estudo de Colombi *et al.* (2021) também investigou a biopurga com enzima pectinase e o bioalvejamento com ácido peracético, realizados simultaneamente em condições de temperatura e pH diferentes, com resultados relevantes.

Usluoglu e Arabaci (2014) conduziram um processo de biopurga e bioalvejamento em um tecido de algodão/poliamida, de forma simultânea em uma única solução aquosa. Utilizaram enzimas lipase, protease e pectinase, além de ácido peracético. O processamento foi realizado a 60°C por 45 minutos, com pH 7,5. Este método resultou em uma melhoria significativa na hidrofiliabilidade e no grau de brancura em comparação com processos oxidativos tradicionais, e ainda apresentou maior resistência à tração. A formulação incluiu 20 g/L de tetracetililenodiamina (TAED), 12 g/L de perborato de sódio, 2 g/L de enzimas GOx e 1 g/L de auxiliar não iônico (Besegatto *et al.*, 2018).

Moraes *et al.* (2013) avaliaram o resultado de uma composição de enzimas comerciais (3,580 U/g de celulase, 0,236 U/g de lipase, e 0,868 U/g de pectinase) na limpeza do substrato de 100 % algodão. A utilização destas três enzimas apresentou bons resultados no grau de branco (24, 99 °Berger), eliminação de pectina (74,61%) e hidrofiliabilidade (14- 2 s). A metodologia utilizada por Silva *et al.* (2013) igualou ou até superou os resultados alcançados com agentes químicos convencionais em termos de grau de brancura, mas com um menor consumo de água, tempo (40min) e energia (55 °C) em pH próximo ao neutro (6,5), resultando em impactos ambientais reduzidos (Stéphanie *et al.*, 2018).

Uma das vantagens do processo integrado em comparação com o processo convencional que envolve agentes químicos é que, no processo integrado, a solução aquosa é

trocada apenas uma vez, enquanto no processo convencional ela é trocada cinco vezes. Isso resulta em uma redução significativa no consumo de água (Ali *et al.*, 2014).

A utilização de enzimas em processos industriais têxteis representa uma abordagem que, embora inicialmente mais onerosa em termos de custo, oferece vantagens consideráveis. Essas enzimas podem ser aplicadas em diversas fases dos processamentos têxteis, incluindo desengomagem, limpeza, alvejamento e acabamento, particularmente no tratamento de substratos de algodão. A capacidade de trabalhar em uma única solução aquosa permite uma redução na quantidade de água e energia utilizada, culminando em um custo global inferior quando comparado aos métodos convencionais que empregam agentes químicos. Essa eficiência não apenas tem implicações econômicas, mas também ressoa com os princípios de sustentabilidade e responsabilidade ambiental (Chiarello *et al.*, 2020).

### 3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

#### 3.1 SUBSTRATO TÊXTIL

Os ensaios e testes experimentais foram realizados no laboratório químico têxtil do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) de Blumenau. Nesta seção serão apresentados os materiais, reagentes e equipamentos utilizados, bem com a descrição dos procedimentos realizados durante os ensaios laboratoriais.

O tecido utilizado neste trabalho foi gentilmente cedido pela empresa Coteminas S.A. Blumenau, tendo as seguintes características: tecido plano, 100% algodão cru engomado, com fios de título Ne 36/1 ou Tex 16 no urdume e na trama, gramatura final de 104 g/m<sup>2</sup>, com estrutura tafetá 1x1. As informações de tecimento e dos fios de urdume são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações técnicas do tecido 100 % algodão engomado

	TITULAÇÃO	FIOS/in	F. COBERTURA	g/m.L	g/m <sup>2</sup>
URDUME	Ne 36/1 CO OE	79	13,17	162,2	56,0
TRAMA	Ne 36/1 CO OE	64	11,31	140,9	48,6
TOTAL		143	24,48	303,1	104,6

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

No Quadro 5, é apresentada a composição da solução engomante aplicada pela empresa que forneceu o material para os fios de urdume do tecido utilizado neste estudo. Além do amido de milho, a solução contém agentes surfactantes auxiliares, cujo objetivo é aprimorar as propriedades de resistência do fio de urdume contra os atritos mecânicos no tear.

Quadro 5 - Formulação da solução de engomagem aplicada aos fios de urdume

Agentes	Quantidades	Unidade
Amido de milho	0,0043	kg/m.l
Rucofilm SR	0,0171	kg/m.l
Amaciante engomagem	0,0013	kg/m.l
Softsol JM	0,0001	kg/m.l
Carga Goma	12,30	%
Sólidos da Goma	8,10	%
Pick-Up	100	%

Fonte: Coteminas S.A. (2021)

### 3.2 EQUIPAMENTOS E REAGENTES UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

Os equipamentos utilizados nos experimentos estão apresentados no seguinte quadro:

Quadro 6 - Relação de equipamentos utilizados durante a pesquisa

<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>FABRICANTE</b>	<b>MODELO</b>
Máquina de tingir HT 8	Kimak	AT1-SW
Foulard	Metal Workig	500 PV
Balança analítica digital	Shimdzu	AUY 220
Rameta	Metal Working	MD 350
Cabine de Luz	Comexim	ASTM D -1729
PHmetro	Digimed	DM 22
Espectrofotômetro Data	Datacolor	D500

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

As enzimas utilizadas no presente estudo foram gentilmente cedidas pela empresa AKMEY Biotecnologia. Os reagentes e enzimas utilizados nesse estudo estão apresentados no quadro a seguir:

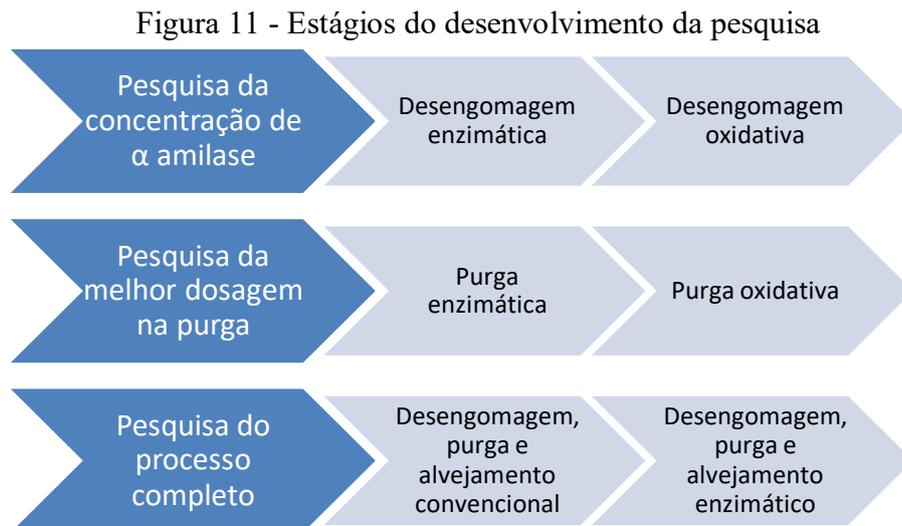
Quadro 7 - Agentes e reagentes utilizados

<b>REAGENTES/ENZIMAS</b>	<b>FUNÇÃO</b>	<b>FORNECEDOR</b>
Enzima $\alpha$ -amilase, BIOKEY BSL H CONC.	Aniônico, pH ótimo 6,0 a 8,0	AKMEY
Enzima pectinase, BIOKEY PCR VII	Não iônico, pH ótimo 4,5 a 6,5	AKMEY
Enzima Peroxidase	Concentrado enzimático em pó granulado coloração avermelhado	AKMEY
Enzima Glicose Oxidase GLUZYME FORTIS 2X BG	Concentrado enzimático granulado, além de enzima ativa proteína. Coloração amarelado. pH ótimo 5,0 – 5,5	NOVOZYME DINAMARCA
Berol 175	Surfactante não iônico – álcool graxo etoxilado	MACLER
Astarol D-cor	Detergente contendo tensoativo não iônico e aniônico	NS QUÍMICA
Anstaquest SBC	Sequestrante de cálcio, magnésio e ferro. Caráter aniônico	NS QUÍMICA
Peróxido de Hidrogênio( $H_2O_2$ )	Agente oxidativo de pigmentação	ÊXODO CIENTÍFICA
Ácido acético glacial	P.A ACS 99,7%	ÊXODO CIENTÍFICA

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos realizados foram divididos em diferentes etapas de execução, visando obter melhores resultados e facilitar a interpretação dos dados. No total, foram realizadas seis etapas distintas, como demonstrado na Figura 11.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Inicialmente, foram conduzidos diversos experimentos visando otimizar a etapa de desengomagem enzimática, com o objetivo de determinar a concentração ideal de  $\alpha$ -amilase para obter a remoção desejada da goma presente no substrato têxtil.

Posteriormente, foram realizadas em banho único, a desengomagem, purga e pré-alvejamento, de modo a proporcionar maior eficiência e realizar ensaios comparativos entre os processos oxidativos e os enzimáticos.

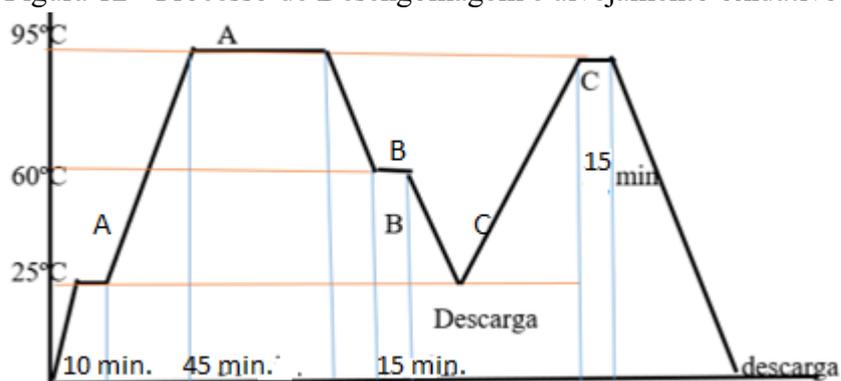
Uma vez estabelecida a quantidade adequada de  $\alpha$ -amilase, o processo prosseguiu para as etapas de biodesengomagem, biopurga e bioalvejamento, utilizando as enzimas pectinase e glicose oxidase (GOx), respectivamente em banho único.

Os resultados obtidos nos bioprocessos serão comparados com os processos químicos convencionais em cada etapa.

### 3.3.1 Desengomagem e pré-alvejamento oxidativo

Os ensaios dos processos convencionais com agentes químicos foram conduzidos por meio do método de esgotamento. A realização desses procedimentos, que incluiu tanto a desengomagem quanto o pré-alvejamento oxidativo simultâneo, ocorreu em uma máquina HT 8 Kimak, modelo AT 1 SW, equipada com oito canecos. A formulação utilizada considerou o perfil de temperatura apresentado no gráfico da Figura 12. Os ensaios foram conduzidos com amostras de tecido pesando 15 g e um volume de solução aquosa de 150 mL (proporção de banho de 1:10). O processo foi executado com um gradiente de temperatura de 4°C por minuto, variando de 25°C a 95°C, seguido por um resfriamento de 5°C por minuto, totalizando um tempo de 100 minutos. O método aqui descrito foi adaptado de um simpósio têxtil (Bezerra *et al.*, 2015) e incluiu a utilização de agentes químicos fornecidos por empresas parceiras.

Figura 12 - Processo de Desengomagem e alvejamento oxidativo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O processo foi executado da seguinte forma:

Fase (A) foram inseridos na receita os seguintes agentes químicos:

- 1 g/L de detergente Anstaren M-HU conc.;
- 1 g/L Anstarquest SBC;
- 0,4 g/L de silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_4$ );
- 4,5 ml/L de soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ) 50 Bé;
- 5 ml/L de peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

Na fase (B) foi inserido:

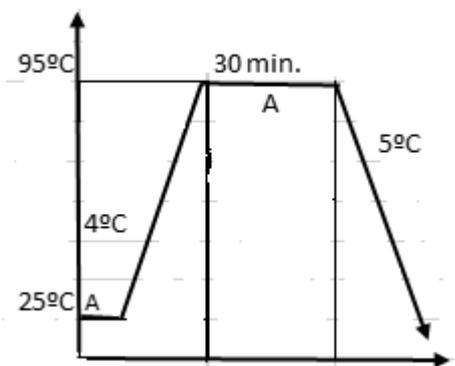
- Solução tampão de 1mL ácido acético glacial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) em 100 mL de água na fase de neutralização da solução aquosa.

Na fase (C) foi executado uma lavação com 1g/L Anstarol D-Cor, seguido de enxague em água temperatura ambiente.

### 3.3.2 Desengomagem oxidativa

No processo convencional oxidativo de remoção da goma utilizando agentes químicos, foram empregadas formulações comumente utilizadas em empresas têxteis do Vale do Itajaí durante os processos industriais. Essas formulações consistiram em uma concentração de 4,5 g/L de soda cáustica a 50 Bé, 1 g/L sequestrante (Anstarquest SBC) e 1g/L de detergente (Anstaren M-HU CONC). O processo foi conduzido por 30 minutos a 95 °C, com a máquina operando a 50 rpm e um gradiente de aumento da temperatura de 4° C/min, resfriando a 5°C/min na máquina Kimak AT1-SW, conforme Figura 13.

Figura 13 - Desengomagem oxidativa



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Para uma verificação de aumento na remoção de goma, foi realizada uma adaptação da receita com base na realidade dos processos têxteis na região do Vale do Itajaí. Nessa adaptação, aumentou-se a quantidade de NaOH 50 Bé para 5 ml/L, resultando em um pH elevado de 11,8 a 12. Para fins de comparação entre os processos oxidativos e enzimáticos, utilizou-se a formulação apresentada na Tabela 2, preparada em uma solução aquosa na proporção de 1/10, e a máquina foi operada a uma velocidade de rotação de 50 rpm.

Tabela 2 - Agentes utilizados na desengomagem convencional

Agentes Químicos	Quantidade
Anstaren M-HU CONC.	1g/L
Anstarquest SBC	0,5 g/l
NaOH 50Bé	5mL/L
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 130 vol.	5 mL/L
CH <sub>3</sub> COOH	3 mL/L

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Após a desengomagem, foram realizados enxágues com água corrente no substrato para remover residuais de agentes engomantes do substrato. Em seguida, o excesso de líquido foi removido do substrato utilizando um Foulard com pressão de 4,5 bar. Por fim, o substrato foi deixado secar em um varal vertical, à temperatura ambiente.

### 3.3.3 Ensaios enzimáticos

Os ensaios que envolveram a aplicação de enzimas foram conduzidos empregando a formulação descrita no Quadro 8.

### 3.3.4 Biodesengomagem enzimática

A etapa de biodesengomagem foi conduzida utilizando a enzima  $\alpha$ -amilase BIOKEY BSL H CONC, gentilmente fornecida pela empresa Akmey. O processo foi realizado em uma máquina de tingimento HT 8 Kimak AT 1 SW, com uma rotação de 50 rpm, durante 30 minutos, e com variações de temperatura, pH e % de enzima, conforme Tabela 3. Amostras de tecido de 10 g foram submetidas ao processo em uma relação de banho (RB) de 1:15, contendo 1 g/L do surfactante não iônico Berol 175 (álcool graxo etoxilado), fornecido pela empresa Macler.

O ajuste do pH foi realizado utilizando carbonato de sódio em solução tampão de 10g/L e ácido acético glacial em solução tampão de 5 mL/L até o valor de pH desejado. Ao longo deste processo experimental, foram investigadas diversas variáveis, englobando valores distintos de pH, temperaturas e concentrações diferenciadas de enzimas. O estudo foi composto por um total de 18 experimentos, conforme Tabela 3.

A avaliação da remoção de amido presente nos tecidos foi realizada mediante a aplicação do método da escala de Tegewa. Os pormenores relativos a esses tratamentos

específicos estão sistematizados na Tabela 3, evidenciando as configurações experimentais adotadas na pesquisa.

Os experimentos foram concebidos e executados com o propósito de determinar a concentração ótima de enzima, o pH e a temperatura adequados para a remoção eficaz da goma. Para essa finalidade, foi empregada a enzima  $\alpha$ -amilase (BIOKEY BSL H CONC), caracterizada por sua termoresistência, o que permite a sua aplicação em temperaturas elevadas, podendo chegar até 90 °C.

As amostras desengomadas foram divididas para análises subsequentes, com três direcionadas para purga alcalina, três para purga enzimática e três designadas como padrão, utilizadas em testes de resíduos de goma e hidrofiliidade. O protocolo experimental para todos os ensaios incluiu uma velocidade de rotação fixada em 50 rpm e curva de subida da temperatura de 4°C por minuto.

Tabela 3 - Experimentos realizados no laboratório.

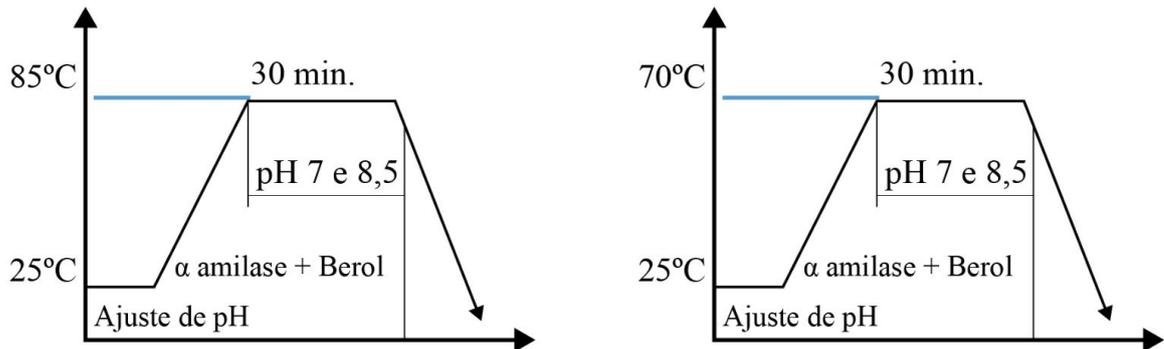
Experimentos	Temp. °C	pH	Tempo min.	$\alpha$ amilase	Berol 175	Escala Tegewa
01	85	7,0	30	0,2500	1	7
02	70	7,0	30	0,2500	1	8
03	70	8,5	30	0,2500	1	6
04	85	8,5	30	0,2500	1	7
05	70	7,0	30	0,5000	1	7
06	70	8,5	30	0,5000	1	5
07	85	8,5	30	0,5000	1	6
08	85	7,0	30	0,5000	1	7
09	85	7,0	30	1,0000	1	6
10	70	7,0	30	1,0000	1	7
11	70	8,5	30	1,0000	1	6
12	85	8,5	30	1,0000	1	6
13	70	8,5	30	1,5000	1	6
14	85	8,5	30	1,5000	1	6
15	70	7	30	0,1000	1	5
16	70	8,5	30	0,1000	1	5
Oxidativa	95	12,2	30		1	2

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na etapa de execução dos trabalhos relacionados à fase de biodesengomagem, foram adotadas formulações e temperaturas específicas, conforme ilustrado no processo da Figura 14.

O processo envolveu modificações tanto no pH quanto na temperatura, mantendo, contudo, mantendo o mesmo tempo, curva de subida da temperatura em 4°C por minuto e rotação da máquina em 50 rpm.

Figura 14 - Ensaio realizados na etapa de desengomagem enzimática



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 3.3.4.1 Limpeza (purga) enzimática

Após a etapa de biodesengomagem, as amostras foram direcionadas para a etapa de limpeza (purga), utilizando a enzima pectinase, com o nome comercial BIOKEY PCR VII.

Os ensaios foram realizados na máquina Kimak AT 1 SW com rotação de 50 rpm e gradiente de aquecimento de 4 °C por minuto, modificando apenas o pH entre 7 e 8,5.

Para esses ensaios foram utilizadas as amostras biodesengomadas conforme descrito no item 3.3.3.1. A formulação utilizada seguiu os parâmetros recomendados pelo fornecedor Akimey Biotecnologia. Foram conduzidos dois tratamentos distintos, conforme descrito na Tabela 4 e ilustrado na Figura 15.

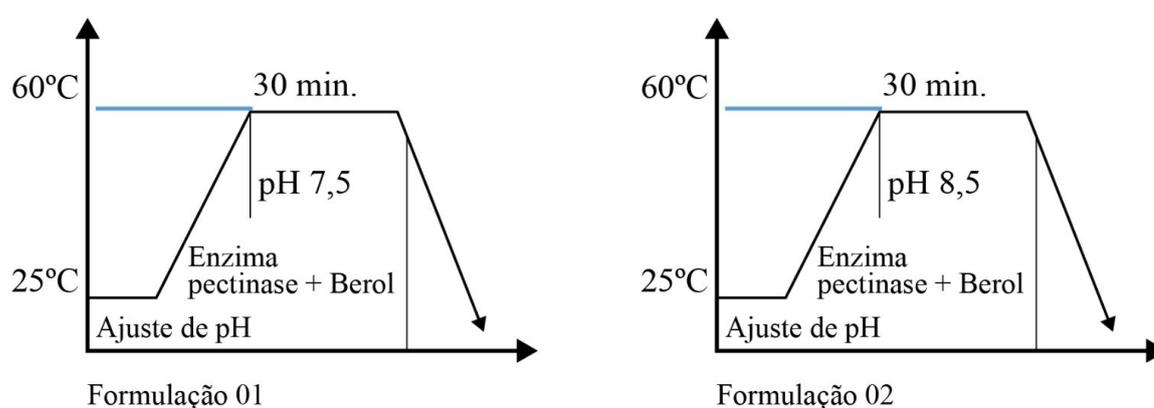
Ao final do processo, foi realizado o enxágue em água corrente para remover as impurezas pectinas e ceras presentes no substrato de algodão. Em seguida, o substrato foi espremido em foulard com uma pressão de 4,5 bar e seco em varal em temperatura ambiente.

Tabela 4 - Formulações da etapa de purga enzimática

Formulação	Enzima Pectinase	Berol 175	Tempo	Temperatura	pH
1	1,2 g/L	0,5 g/L	30 min.	60 °C	7,5
2	1,5 g/L	0,5 g/L	30 min.	60 °C	8,5

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Figura 15 - Gráfico do processo de limpeza (purga) enzimática.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Nas duas formulações de purga foram executadas de forma por esgotamento, após foi passado em hidroextractor e a secagem em varal em temperatura ambiente, foram realizados os testes de hidrofiliabilidade por capilaridade e por teste de gota e quantificação de pectina residual.

### 3.4 PRÉ-ALVEJAMENTO

#### 3.4.1 Processo sequencial de desengomagem, purga e alvejamento oxidativo

Com o objetivo de investigar a viabilidade de um tratamento de alvejamento químico no mesmo banho, foi conduzido um processo sequencial, ajustando o banho de acordo com a composição necessária para cada etapa. No Quadro 8 estão apresentadas as condições do processo, composição do banho e tempo utilizado.

Quadro 8 - Formulação e dados do processo integrado em banho único de desengomagem enzimática e processos oxidativos

Fases do processo	Agentes utilizados	Concentrações	pH	Tempo	Temperatura °C
Desengomagem	Surfactante	1g/L	7	30	70
Desengomagem	NaOH	5 mL/L			
Purga	Surfactante	1g/L	8,5	30	85
Purga	Sequestrante	1g/L			
Purga	NaOH	1 g/L			
Alvejamento	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5mL/L	11,2	40	95
Alvejamento	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,4 g/L			

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 5 - Tabela Custos de agentes químicos utilizado nas formulações

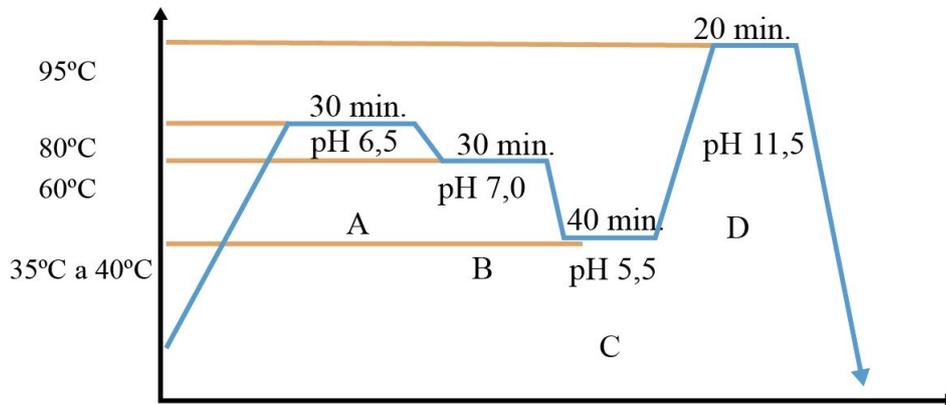
PROCESSOS	Agentes químicos	Valor por kg de substrato (R\$)
Desengomagem	NaOH 50Bé	0,105
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0,100
	Surfactante	0,15
Purga	NaOH 50Bé	0,105
	Sequestrante	0,11
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 130 col.	0,45
Pré-alvejamento	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 130 vol	0,45
	Estabilizador de peróxido	0,15
	Surfactante	0,15

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3.4.2 Processo sequencial de biodesengomagem, biopurga e bioalvejamento

Foram realizados processos sequenciais em um único banho, utilizando concentrações enzimáticas para cada etapa. As enzimas foram adicionadas ao banho, o qual foi ajustado de acordo com as condições de processos de forma específica para cada condição de processo. A Figura 16 apresenta o gráfico do processo completo de preparação de algodão utilizando enzimas em um único banho.

Figura 16 - Desengomagem, purga e alveamento enzimático simultâneo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Fase A = 1,0 a 1,5 g/L de  $\alpha$  amilase + 0,5 g/L Berol 175

Fase B = 1,2 g/L de Enzima Pectinase

Fase C = 0,5 g/L de GOx + 12 g/L Glicose

Fase D = ajuste de pH para 11,5 e elevada temperatura.

### 3.4.3 Bioalveamento

Nesta fase da pesquisa, utilizou-se substrato cru engomado, e o processo foi conduzido seguindo os parâmetros estabelecidos para desengomagem e purga, conforme realizado nas etapas anteriores. O substrato com massa de 10 gramas foi adicionado em um caneco com relação banho de 1:15. Realizado as etapas de biodesengomagem, biopurga e bioalveamento com as enzimas específicas. A formulação e concentrações utilizadas estão inseridas no quadro 9. Com o objetivo de acelerar a geração do peróxido de hidrogênio  $H_2O_2$ , utilizou-se 12 g/L de glicose pura analítica.

Quadro 9 - Formulação do alveamento enzimático

Experimentos	Berol 175 (g/L)	pH	$\alpha$ -amilase (g/L)	pH	Pectinase (g/L)	pH	GOx (g/L)	Glicose (g/L)
1-2-3	0,5	6,5	1,5	7,0	1,2	5,5	0,5	12
4-5-6	0,5	6,5	1,0	7,0	1,2	5,5	0,5	12
7-8-9	0,5	6,5	1,5	7,0	1,2	5,5	0,5	12
10-11-12	0,5	8,5	1,0	7,0	1,2	5,5	0,5	12

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os procedimentos e formulações executadas, conforme ilustrado na Figura 16, demonstram como foi realizado o processo em uma solução aquosa única, tendo como premissa a utilização dos residuais da retirada de goma na primeira etapa (A) da enzima  $\alpha$  amilase como fator gerador de  $H_2O_2$ . Na fase (B) o pH e a temperatura foram ajustadas e a limpeza (purga) foi realizada apenas adicionando a enzima pectinase. Na fase (C), o pH e a temperatura foram ajustados novamente e a enzima GOX (glicose oxidase) e glicose foram adicionadas. Após essa fase, a temperatura foi elevada para 95 °C e o pH foi ajustado para 12,2 para executar o processo de alvejamento utilizando o peróxido de hidrogênio gerado *in situ* na etapa anterior com a enzima GOx. No entanto, após várias tentativas, não foi observada a ocorrência do branqueamento desejado acima de 50 graus Berguer.

A Tabela 6 apresenta valores financeiros que correspondem ao mercado vigente em processos têxteis. Nessa análise, foram contemplados os custos dos agentes químicos aplicados em cada estágio do processo, bem como os custos das enzimas, fornecidos por empresas especializadas na comercialização de produtos e enzimas. É importante ressaltar que os custos podem variar, dependendo dos procedimentos específicos realizados por cada empresa têxtil, assim como a fonte de combustível utilizada na geração de vapor.

Tabela 6 - Custos por processos e enzimas

PROCESSOS	ENZIMAS	Valor por kg de substrato (R\$)	Valor por kg substrato agentes químicos R\$
Desengomagem	$\alpha$ -Amilase.	0,045	0,27
Purga	Pectinase.	0,171	0,70
Alvejamento	Glicose Oxidase	0,437	0,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A Tabela 6 delinea alguns dos custos principais associados a cada etapa do processo a úmido. Os valores apresentados foram parcialmente baseados em informações fornecidas por empresas e representantes de auxiliares para a indústria têxtil, incluindo os custos dos agentes químicos por processo. As enzimas, sendo custeadas por quilograma de produto, foram adquiridas de empresas fornecedoras desses insumos.

Além disso, o consumo de vapor foi considerado, tendo como referência a quantidade indicada na Figura 29, em anexo. Valores empíricos de consumo de vapor na indústria têxtil,

### 3.5 ENSAIOS ANALÍTICOS

#### 3.5.1 Determinação da quantidade de amido residual no tecido

A avaliação da desengomagem foi feita por meio da análise da concentração de amido junto ao substrato utilizando a escala de Tegewa, técnica amplamente utilizada industrialmente. Para realizar a análise, o tecido foi cortado em tamanho 1 cm x 1 cm, adicionado em um béquer contendo 5 mL de uma solução de iodo e iodeto de potássio, deixada por 2 min e, em seguida, avaliado (Karmakar, 1999).

O índice de amido no substrato é avaliado pela intensidade da coloração azul conforme a escala de Tegewa apresentada na Figura 17. A escala de cores associada a concentração de amido varia entre 2,5 % e 0,1 % de acordo com a Tabela 7.



Fonte: Marroques, (2020)

Tabela 7 - Valores de concentração de amido em tecidos - Escala Tegewa

Escala Tegewa	% Amido
9	<0,10
8	0,10 – 0,14
7	0,14 – 0,20
6	0,20 – 0,30
5	0,30 – 0,50
4	0,50 – 0,90
3	0,90 – 1,50
2	1,50 – 2,50
1	>2,50

Fonte: Manual da Merck (2018)

Nessa escala, a cor mais escura (escala 1) indica elevada presença de amido. A coloração amarela pálida indica que o amido hidrolisado de forma eficiente. A ausência de coloração indica a inexistência de amido (Furlan, 2012).

### **3.5.2 Teste de hidrofiliidade vertical por capilaridade**

Hidrofiliidade é uma propriedade que se refere à capacidade de um material, como um tecido de algodão, de absorver água ou soluções aquosas verticalmente por meio do fenômeno conhecido como capilaridade. Para avaliar essa característica, é empregado o método de capilaridade, que tem como base o padrão JIS L 1907 (JIS, 2004), com algumas adaptações específicas.

No procedimento do teste de capilaridade, uma amostra de tamanho 2,5 cm x 20 cm é utilizada. Nesse estudo, a borda inferior da amostra, com uma altura de 2 cm, é imersa em um recipiente contendo uma solução com 5% do corante direto Azul Turquesa G. O tempo é cronometrado durante 5 minutos, sendo realizadas medições em intervalos de 1 em 1 minuto a partir do momento em que a amostra entra em contato com a solução do corante.

A quantidade de solução aquosa absorvida pela amostra ao completar o tempo de 5 minutos é medida. Quanto maior a altura da coluna de solução na qual ocorreu a umectação da amostra, melhor será a capacidade de absorção vertical do tecido, indicando uma maior hidrofiliidade.

### **3.5.3 Teste de hidrofiliidade por gotejamento (NBR 13000)**

Antes do teste de hidrofiliidade por gotejamento, o tecido foi adequadamente preparado e condicionado conforme descrito na NBR 8428, que estabelece condições específicas de temperatura e umidade para o substrato durante 24 horas, a fim de torná-lo mais adequado para os testes.

A avaliação do grau de hidrofiliização foi conduzida em conformidade com a norma ABNT NBR 13000, que estabelece os critérios para determinar se um tecido é hidrófilo ou não. A metodologia prescrita por essa norma exige que o tecido seja acomodado em um bastidor, similar ao utilizado em máquinas de bordar, com o intuito de mantê-lo esticado e sem dobras.

A distância entre a ponta da bureta e o tecido deve ser fixada em 40 mm, e a solução de corante, preparada com 1 g/L de azul direto 86 (nº 74180 - Índice de Cor) em água destilada, deve ser colocada na bureta, ou somente em água destilada. A configuração da bureta deve ser ajustada para liberar uma gota da solução.

A formação da gota é cronometrada, e é fundamental destacar que o tempo de absorção da gota de corante pelo tecido não deve ultrapassar 5 segundos. O tempo de molhagem de 5 segundos ou menos equivale a uma absorção adequada da amostra para os tratamentos de beneficiamento posteriores (Manasi *et al*, 2013). Esse limite temporal é estabelecido para atender aos critérios rigorosos de hidrofiliidade, garantindo assim uma avaliação precisa e conforme os padrões normativos.

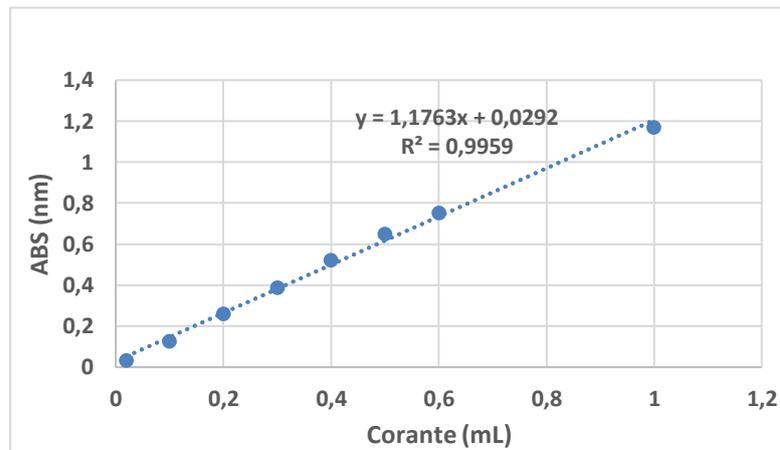
### **3.5.4 Teor de pectina removida**

A pectina presente na cutícula da fibra tem caráter ácido pela presença dos ácidos galacturônicos presentes da sua cadeia. Essa característica permite que tenha afinidade com corantes básicos. Para a determinação da pectina residual foi realizado o tingimento das amostras com azul de metileno, sendo considerado o padrão de remoção (100 % de remoção) a amostra feita na purga alcalina. Quanto maior for a remoção da pectina, maior a quantidade de corante residual no banho, cuja quantidade é medida em espectrofotômetro de absorbância a 660 nm.

Na metodologia empregada para determinar o teor de pectina removida das amostras de tecido plano, inicialmente dissolve-se 0,1919 gramas de azul de metileno em 1 litro de água deionizada. Esta abordagem é fundamentada na interação estequiométrica entre o cátion do corante azul de metileno e o ânion da pectina, uma substância presente nas fibras do tecido.

Especificamente, o azul de metileno reage com o ácido poligalacturônico contido na pectina. A purga alcalina é empregada como padrão, sendo considerada capaz de remover 100% da pectina presente nas fibras. A partir desta interação, a quantidade de pectina residual na amostra pode ser quantificada, já que quanto maior for essa quantidade, maior será a quantidade de azul de metileno absorvida nas fibras e maior será a intensidade da cor. Na Figura 18, é apresentada a curva de calibração para o azul de metileno.

Figura 18 - Curva de Calibração para Azul de Metileno



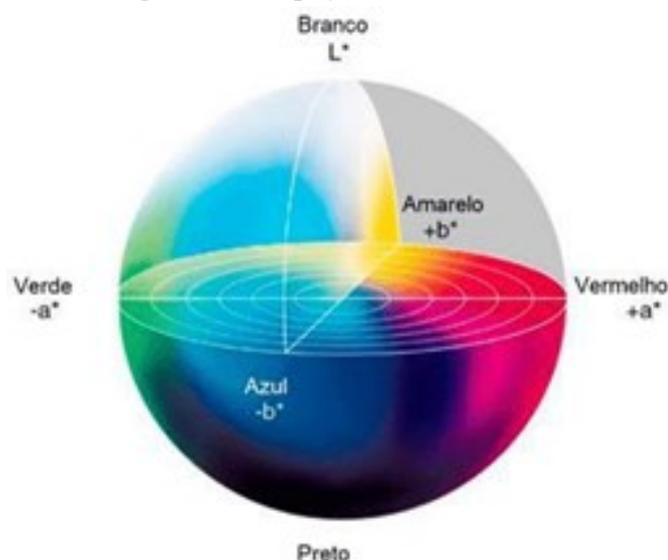
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

### 3.5.5 Grau de brancura

O grau de brancura, também conhecido como grau de alvura, foi determinado nos corpos de prova submetidos ao processo de biopreparação e preparação convencional, usando um espectrofotômetro de remissão com lâmpada padrão, Datacolor 500, cerâmica branca como padrão de calibração, de acordo com a norma ASTM E313-15.

O processo para avaliar o grau de brancura empregou o sistema CIE (CIELAB), que estabelece uma relação entre os valores de cor e a percepção visual humana, representada em um espaço tridimensional definido pelas coordenadas L, "a" e "b". A coordenada L quantifica a luminância e varia entre 0 (preto) e 100 (branco), enquanto as coordenadas "a" e "b" descrevem as cores. A coordenada "a" negativa tende para o verde, e positiva para o vermelho; a coordenada "b" negativa indica uma tendência ao azul, e positiva ao amarelo (Travis, 2005). A Figura 19 ilustra o espaço de cor CIELAB. A medição da leitura será feita em grau Berger.

Figura 19 - Espaço de cor CIELAB



Fonte: Minolta (2007)

### 3.5.6 Comportamento tintorial

A mensuração da coloração será feita por meio do sistema CIELab, espaço de cor ( $L^*$   $a^*$   $b^*$ ) e diferença de cor ( $\Delta E^*ab$ ). Este método localiza a cor em um espaço tridimensional, usando como coordenadas:  $L^*$  (luminância), que pode variar de 0 (preto) a 100 (branco);  $a^*$ , que assume valores negativos (verde) ou positivos (vermelho); e  $b^*$  que assume valores negativos (azul) e positivos (amarelo), sendo que os planos  $a^*b^*$  podem ocorrer em qualquer nível de  $L^*$ .

As amostras obtidas nos processos de pré-alveamento químico e nos processos de bioalveamento foram tingidas por esgotamento em uma máquina de tingimento HT 8 Kimak mod. AT 1 SW, com corante reativo durante 90 minutos a 60 °C e relação de banho 1:20. Para o tingimento foi utilizada a formulação apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Produtos químicos utilizados no tingimento.

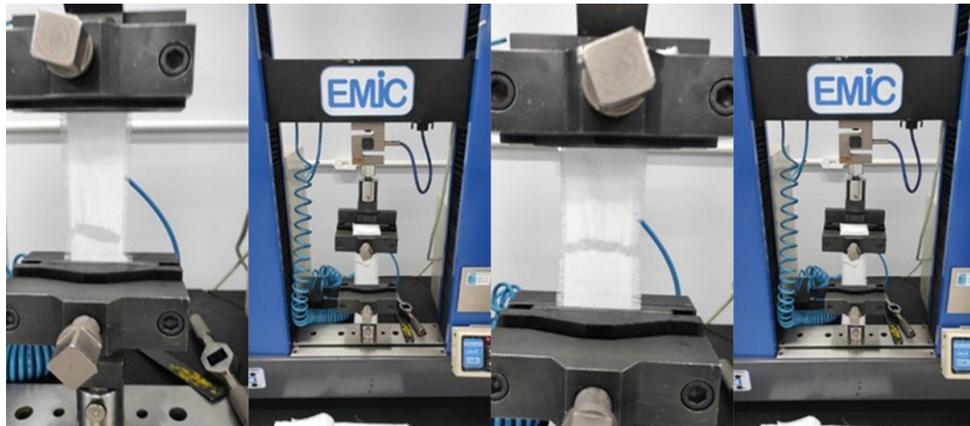
Quantidade	Produto
0,25; 0,5; 1,0 %	Corante Red 195
7,5 g/L	Carbonato de Sódio
30,0 g/L	Cloreto de Cálcio
0,5 g/L	Berol 175®

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

### 3.5.7 Teste de tração

Os ensaios para determinar a resistência à tração foram executados em conformidade com a norma ABNT NBR 11912, regulamentação que prescreve o método para avaliar tanto a resistência à tração quanto o alongamento, através do procedimento de ensaio denominado Grab. A análise empregou cinco corpos de prova, cada um com dimensões específicas de 25 mm de largura e 100 mm de comprimento. Para a execução dos ensaios, foi utilizado o equipamento EMIC DL 200, que foi equipado com uma célula Trd 26. Tais ensaios foram realizados nas instalações do Instituto Senai LAFITE, localizado em Brusque, Santa Catarina. A Figura 20 apresenta o aparelho utilizado para medir a tração.

Figura 20 - Teste de tração no dinamômetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos através dos testes de biodesengomagem, biopurga e bioalveamento, proporcionando um comparativo com os métodos convencionais deste processo. As referências para o comparativo foram os procedimentos tradicionais, executados com formulações químicas, frequentemente empregados nas indústrias têxteis da região do Vale do Itajaí.

### 4.1 AVALIAÇÃO DE DESENGOMAGEM

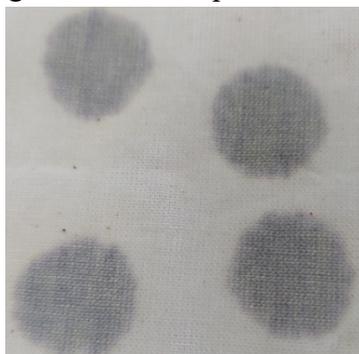
A avaliação de desengomagem foi realizada utilizando dois métodos distintos: gotejamento de iodeto de potássio e imersão em iodeto de potássio, os quais serão apresentados a seguir.

#### 4.1.1 Análise do residual de amido via gotejamento de iodeto de potássio

A avaliação do resíduo de amido foi efetuada após os procedimentos de tratamento, com as amostras já secas e arranjadas em uma cabine de luz com iluminante do tipo dia. A coloração, que é resultado da reação entre a solução de iodeto de potássio ( $KI/I_2$ ) e o amido presente, assume uma tonalidade azul. A intensidade dessa coloração está diretamente correlacionada à concentração do agente engomante remanescente no tecido. As figuras 21 e 22 apresentam imagens correspondentes a cada um dos procedimentos de tratamento empregados.

O tratamento enzimático está representado na Figura 21, que exibe gotas mais arredondadas e coloração menos intensa, indicando menor quantidade de amido sobre o substrato.

Figura 21 - Gotas de reagente iodeto de potássio com tratamento enzimático



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Em contrapartida, o tratamento oxidativo ilustrado na Figura 22, apresenta gotas com formatos mais estrelados e uma coloração mais escura, indicando uma maior concentração de amido no substrato.

Figura 22 - Gotas de reagente iodeto de potássio com tratamento oxidativo



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

No entanto, é importante considerar que o procedimento oxidativo foi desenvolvido em uma máquina laboratorial por esgotamento e em ambiente de caneco fechado. Nesse cenário, a remoção da goma do substrato têxtil aconteceu dentro do ambiente, e, durante o esgotamento da solução, esta se depositou sobre o substrato. Essa situação já estava prevista durante os experimentos em escala laboratorial. Tal condição é atribuída à descarga lenta da solução, levando à sobreposição do agente engomante no substrato, fenômeno este que não se verifica em processos industriais em razão da rápida descarga da solução aquosa. Em contextos industriais, esta remoção da solução engomante nos processos oxidativos tendem a uma melhor eficiência, uma vez que se executa algumas lavações posteriores a desengomagem utilizando maior consumo de água.

De acordo com James; Bemiller; Kavitha (1998), essa observação é comum quando os ensaios são conduzidos em máquinas de laboratório, atribuindo-se ao fato de que não ocorre o transbordo da solução aquosa, e neste caso específico, também pela ausência de agentes na receita capazes de eliminar a goma, atuando apenas na sua desagregação do substrato, deixando-a dispersa no banho (March, 2005).

Dessa forma, em se tratando de desengomagem em laboratório, evidências indicam que o tratamento enzimático foi mais eficaz na eliminação da solução de goma em comparação com o tratamento oxidativo. A biodesengomagem assegura uma remoção, uma vez que reduz

efetivamente o tamanho da molécula de amido, que torna mais solúvel junto ao banho, facilitando sua eliminação durante o processo.

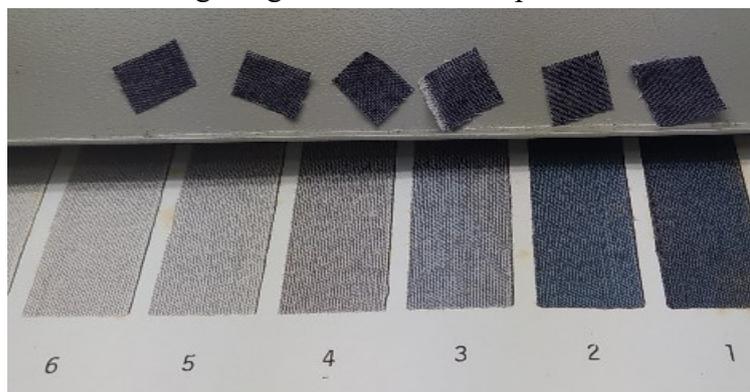
Analisando os resultados de ambos os métodos, enzimático e oxidativo, observa-se que os bioprocessos estão prontos para avançar para as etapas de biopurga e bioalveamento. No entanto, é importante destacar que a desengomagem oxidativa precisaria passar por um reprocesso, uma vez que ainda há uma quantidade significativa de goma presente no substrato, conforme indicado pela análise com a escala de Tegewa.

#### **4.1.2 Análise do residual de amido via imersão em iodeto de potássio**

A análise do residual de amido por meio da imersão em iodeto de potássio foi conduzida da seguinte maneira: uma amostra têxtil com dimensões precisas de 1 cm x 1 cm foi meticulosamente recortada do substrato em estudo. Posteriormente, essa amostra foi submetida à imersão em uma solução contendo iodeto de potássio. O procedimento de imersão foi realizado por um período de dois minutos para permitir que a solução penetrasse nas fibras têxteis e interagisse com o resíduo de amido presente. Após esse período, a amostra foi removida da solução e a coloração resultante foi cuidadosamente observada e comparada com a escala de Tegewa.

No processo de desengomagem oxidativa, evidenciado na Figura 23, foi notada uma coloração mais escura no substrato quando comparada com a coloração obtida nos ensaios enzimáticos realizados. Tal alteração cromática denota a presença de goma, conforme constatado pela comparação com a escala de Tegewa. A intensidade da coloração observada foi semelhante aos valores 1 e 2 na escala mencionada, o que sugere a existência de uma quantidade de goma ainda significativa no substrato. Como já mencionado, os valores obtidos não refletem a realidade dos processos industriais, já que o ensaio em canecos propicia a redeposição da goma de amido no substrato pelo tempo de resfriamento da solução antes do processo de lavagem subsequente.

Figura 23 - Processo desengomagem oxidativo comparativo com escala de Tegewa



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

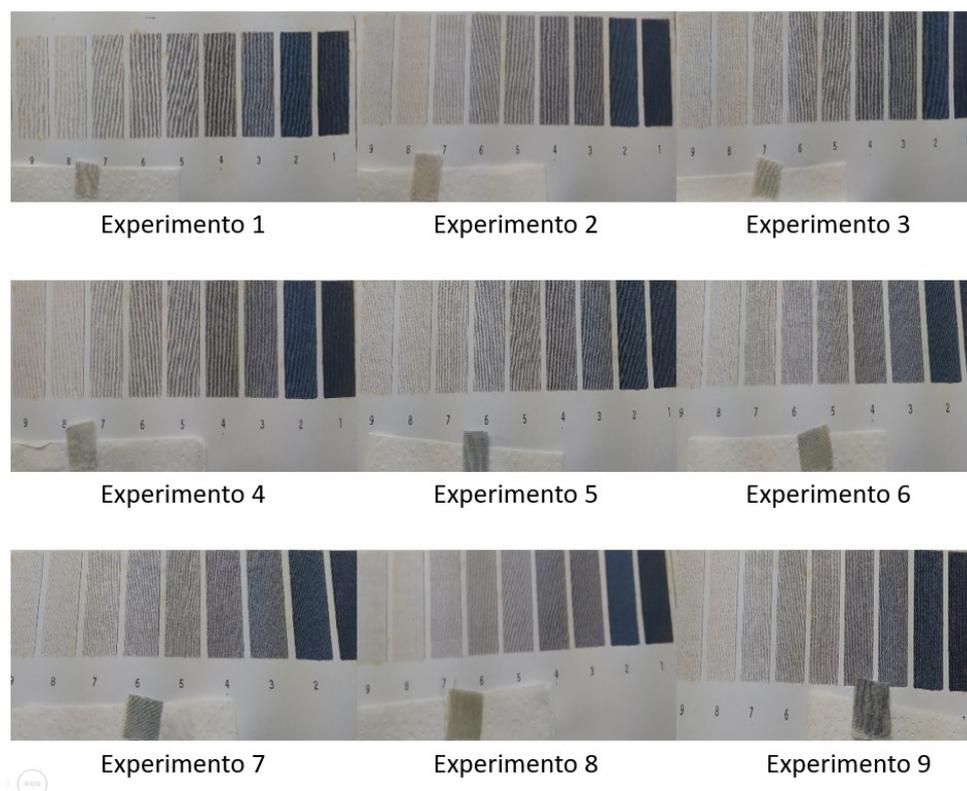
Ao analisar os resultados da biodesengomagem enzimática representados na Figura 24, observou-se uma variação na coloração resultante, abrangendo valores que variaram de 3/4 a 8 na escala de Tegewa. Essa variação cromática é indicativa de diferentes níveis de remoção da goma presente nas amostras têxteis submetidas ao processo enzimático. Valores mais próximos de 8 denotam uma remoção mais completa da goma, sugerindo a efetividade desse método em alguns casos, enquanto valores próximos de 3/4 indicam uma remoção menor da goma em outras amostras.

Além da eficácia comprovada com os resultados obtidos, o uso de  $\alpha$ -amilase nos processos de desengomagem é capaz de agir somente na cobertura de amido sem atacar as fibras (Timar-Balázszy e Eastop, 1998).

Em uma avaliação mais precisa, o Quadro 11 sintetiza todos os 9 experimentos realizados na desengomagem enzimática e o experimento executado na desengomagem oxidativa.

Os resultados sugerem que o processo enzimático ainda pode ser aprimorado para alcançar uma remoção mais eficaz da goma, ao passo que o processo oxidativo demonstrou ser menos eficiente, conforme ilustrado no Experimento 21. Portanto, as abordagens enzimáticas podem prosseguir para as fases subsequentes do tratamento têxtil.

Figura 24 - Avaliação visual da desengomagem enzimática



Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

Quadro 10 - Formulações utilizadas e resultados observados na escala de Tegewa

Experimento	% enzimas	Temp.	pH	Tegewa	Resultado
1	0,250	85	7	7/8	Bom
2	0,250	70	8,5	7/8	Bom
3	0,500	70	7	7	Satisfatório/bom
4	0,500	85	7	8	Muito bom
5	1,000	85	7	6	Satisfatório
6	1,000	70	8,5	5/6	Ruim/satisfatório
7	1,500	85	8,5	5/6	Ruim/Satisfatório
8	0,1500	70	7	6/7	Satisfatório
9	0,1500	70	8,5	3/4	Muito Ruim
21	Oxidativo	95	12,2	1-2	Muito ruim

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A metodologia empregada nas análises permitiu constatar que, mesmo com uma baixa concentração de 0,15% de  $\alpha$  amilase, o grau de extração do agente engomante na biodesengomagem ainda é melhor a desengomagem oxidativa. No entanto a concentração de 0,25% revelou-se ainda ser mais eficaz, produzindo um tecido com propriedades hidrófilas mais adequadas para as fases subsequentes do processamento. Notou-se que concentrações de 0,5% e 1% não resultaram em aumento significativo na eliminação do agente engomante, o que pode sugerir uma saturação da solução. Assim, ficou evidente que uma concentração de até 0,25% da enzima é suficiente para a biodesengomagem eficiente do substrato.

Em estudos realizados em ambientes industriais, empresas que adotaram esse procedimento reportaram a utilização de uma faixa de concentração de  $\alpha$  amilase entre 0,20% e 0,22%. Acima deste patamar, não foi observado um aumento na atividade enzimática, indicando que não há uma maior disponibilidade de substrato para sua ação.

Ao realizar uma análise multivariada por ANOVA considerando os fatores Concentração de enzima (0,25; 0,5, 1,0 %), pH (7,0 e 8,5) e Temperatura (70 °C e 85 °C) sob um delineamento experimental do tipo  $2^3$  fracionado e resposta convertendo as notas em percentagem residual de amido residual, observou-se que o maior efeito no processo é da concentração de enzima presente no banho (Tabela 9)

Tabela 9 - Efeitos dos fatores Concentração de enzima (0,25; 0,5, 1,0 %), pH (7,0 e 8,5) e Temperatura (70 °C e 85 °C) sobre a remoção de amido no processo de biodesengomagem enzimática e a análise de variância (ANOVA).

Effect Estimates; Var.:Var5; R-sqr=,81671; Adj:,54178 (Spreadsheet in análise 3 factors at two levels; MS Residual=,0053643 DV: Var5						
Factor	Effect	Std.Err.	t(2)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,234286	0,030166	7,76644	0,016178	0,104490	0,364081
(1)Enzima	0,197143	0,071922	2,74108	0,111308	-0,112310	0,506596
(2)Temperatura	-0,075000	0,063429	-1,18243	0,358563	-0,347912	0,197912
(3)pH	-0,025000	0,063429	-0,39414	0,731531	-0,297912	0,247912

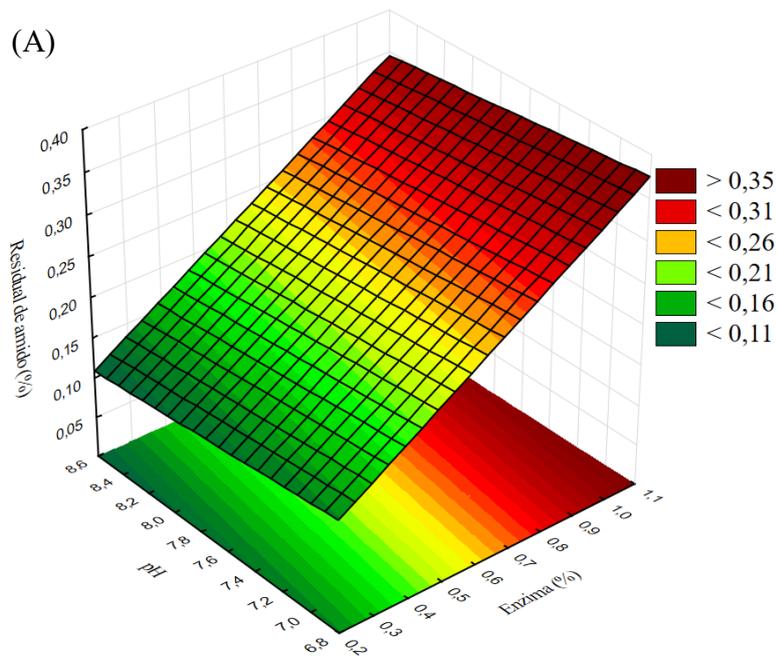
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

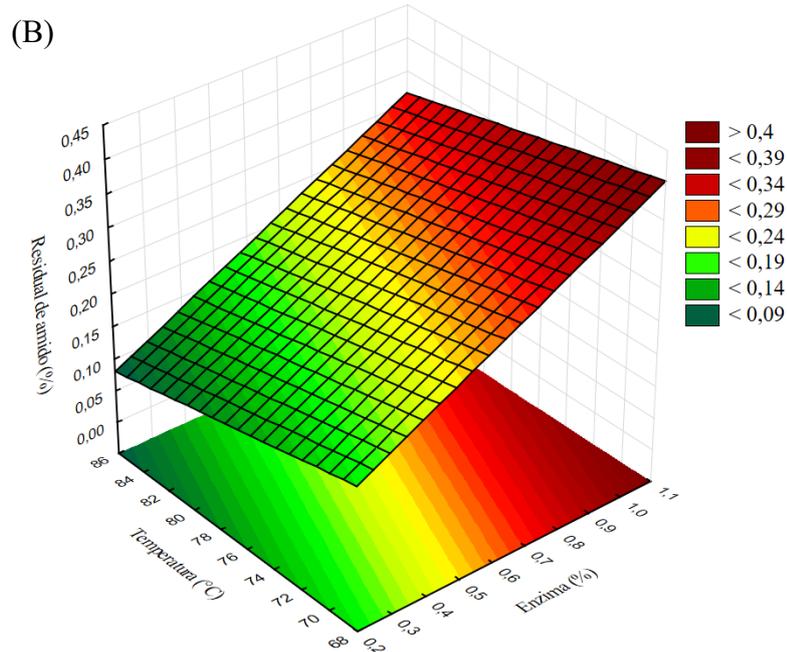
Pela análise estatística, pode-se verificar os efeitos pouco pronunciados obtidos para os fatores temperatura e pH. Os fatores não apresentaram expressividade devido estarem dentro da faixa de parâmetros de atividade da enzima utilizada. Observando o *p-value*, pode-se afirmar que o fator concentração de enzima é significativo com nível de significância de 12 %. Ressalta-

se a análise de amido residual pela escala de Tegewa é observacional, cuja precisão depende do observador, nível de luz e região do tecido em que está sendo avaliada a remoção.

Como resultado da análise de variância obteve-se um coeficiente de regressão ( $R^2$ ) de 0,8167, com o qual, pode-se construir gráficos de superfície de resposta lineares para observar o comportamento do residual de amido no tecido frente à variação da concentração de enzima em relação a variação de pH (A) temperatura (B) (nos valores estudados), conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Comportamento do residual de amido nos tecidos biodesengomados dos parâmetros concentração de enzima e pH (A) e concentração de enzima e temperatura (B)





Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Pela superfície de resposta, mesmo não havendo significância do pH e da temperatura, observa-se uma melhor tendência de remoção em temperaturas mais baixas e pH mais próximo ao neutro. Dos valores de pH mais próximo ao pH 7 já era esperado uma vez que a enzima tem melhores atividade nesse pH, mas ao mesmo tempo é considerado um resultado interessante da não significância desse fator, indicando que é possível o seu uso em conjunto com a pectinase (pectato liase) cujo pH ótimo é em torno de 8. Esse resultado permite a realização da biodesengomagem e biopurga em um único banho.

Em relação à temperatura, observa-se que a tendência de melhores condições de processo quando for conduzido em valores mais baixos, mesmo que a enzima amilase seja uma enzima termo resistente. A temperatura mais baixa denota condições mais interessantes energeticamente e também tem uma relação de interesse com a enzima pectinase utilizada na biopurga. Na Figura 25 (B) verifica-se que em temperaturas menores deve haver uma maior concentração de enzima amilase, provavelmente associado à redução da taxa de reação em temperaturas mais baixas.

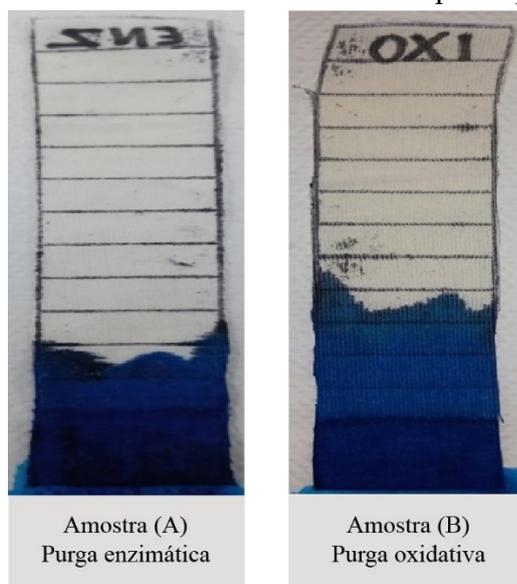
## 4.2 AVALIAÇÃO DA HIDROFILIDADE DO SUBSTRATO APÓS PURGA

A avaliação da hidrofiliidade na purga foi realizada utilizando dois métodos distintos: hidrofiliidade vertical por capilaridade e por gotejamento seguindo a norma ABNT-NBR 13000, os quais serão apresentados a seguir.

### 4.2.1 Avaliação de hidrofiliidade vertical por capilaridade

Os ensaios relacionados à hidrofiliidade vertical por capilaridade foram ilustrados na Figura 26. Os resultados do teste conduzido na vertical estão apresentados em conformidade com o padrão JIS L 1907 (JIS, 2004). A amostra (a) corresponde ao substrato submetido a tratamento enzimático, enquanto a amostra (b) refere-se ao tecido processado de forma oxidativa.

Figura 26 - Teste de hidrofiliidade vertical por capilaridade



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Observou-se que a altura de absorção do corante azul após 5 minutos foi de 3,5 cm para o processo oxidativo e 2,8 cm para o tratamento enzimático, desta forma observou-se que o tratamento enzimático exibiu uma capilaridade ligeiramente inferior em comparação ao processo oxidativo. A condição de hidrofiliidade atingida pelo processo de biopurga é considerada suficiente para os tratamentos a úmido subsequentes. Importante ressaltar que o

processo de pré-alvejamento contribui ainda mais para a remoção de possíveis resíduos de compostos que provocam a hidrofobicidade do tecido, pela presença de NaOH e tensoativos na solução de tingimento. Na indústria, a situação observada nesse trabalho não implica em perda de rendimento tintorial com corantes reativos.

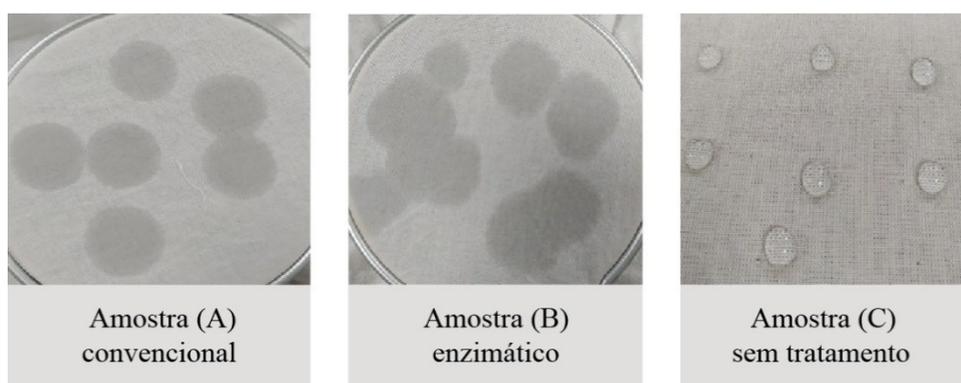
#### 4.2.2 Avaliação de hidrofiliidade por gotejamento (NBR 13000)

Os resultados obtidos nos testes de hidrofiliidade foram realizados seguindo a norma ABNT-NBR 13000. O tempo para captura da imagem foi estabelecido em 5 segundos após a queda das gotas de água destilada sobre o substrato.

O teste de hidrofiliidade avalia o tamanho e a forma do círculo gerado pela gota no tecido, onde uma forma estrelada sinaliza uma absorção deficiente, enquanto uma forma arredondada denota boa hidrofiliidade. Além disso, a norma ABNT-NBR 13000 (1993) estabelece que as gotas devem ser absorvidas no tempo prescrito para confirmar a adequada hidrofiliidade do substrato nos processos subsequentes.

As amostras testadas foram designadas como (A) tratada em purga convencional, (B) em purga enzimática e (C) sem tratamento algum (Figura 27).

Figura 27 - Teste de hidrofiliidade NBR 13000



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Ao analisar a Figura 27, verifica-se que a amostra (A) tratada em purga convencional, apresentou menor afinidade com a água e menor migração da gota, embora apresente absorção adequada, com uma dispersão menos uniforme no tecido, resultando em círculos menores.

A amostra (B) tratada em purga enzimática, mostrou um desempenho superior com uma dispersão mais ampla da gota, indicando maior hidrofiliabilidade.

A análise da hidrofiliabilidade das amostras revelou que a amostra (C) não apresentou absorção de água, devido à ausência de tratamentos contendo agentes como amidos, pectinas, ceras, entre outros.

O resultado apresentado nesse teste corrobora com o resultado obtido no teste de hidrofiliabilidade por capilaridade, confirmando que os tecidos biopurgados estão aptos a continuação dos processos de beneficiamento a úmido.

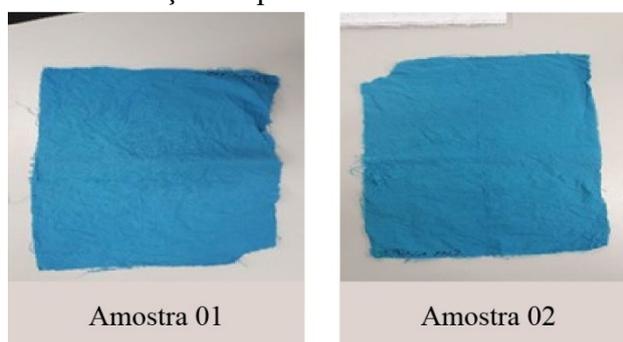
#### 4.3 AVALIAÇÃO DO TEOR DE PECTINA

A avaliação da remoção da pectina da fibra foi conduzida mediante o tingimento das amostras com azul de metileno, um método no qual uma coloração azul mais intensa indica uma maior concentração da pectina no substrato.

Na Figura 28, é possível observar que a amostra 01, tratada pelo processo oxidativo, apresenta uma coloração mais intensa após a purga. Enquanto a amostra 02, tratada pelo processo enzimático, exibe uma coloração mais clara após a purga.

Ambas as amostras demonstram um teor de pectina acentuado, indicando a presença significativa desse componente.

Figura 28 - Coloração adquirida com azul de metileno



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O Quadro 11 apresenta os resultados da coloração com azul de metileno para avaliar o teor de pectinas no substrato.

Quadro 11 - Teor de pectinas no substrato

<b>Pós Banho</b>			
Amostra	Corante (mL)	Água (mL)	ABS (nm)
01 (Oxidativa)	1	9	0,601
02 (Enzimática)	1	9	0,623
<b>Pectina removida</b>			
Amostra	Corante (mL)	Água (mL)	Pectina Removida (%)
01 (Oxidativa)	1	9	48,61
02 (Enzimática)	1	9	50,48

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na etapa pós-banho, os resultados são expressos em Absorbância, sendo que valores mais altos de absorbância indicam um menor teor de pectina presente. A amostra 01, submetida ao processo oxidativo, obteve um resultado de absorbância de 0,601 nanômetros, enquanto a amostra 02, tratada com o processo enzimático, obteve um resultado de 0,623 nanômetros. Ambos os resultados são baixos, sugerindo uma maior quantidade de pectina presente nas amostras.

Além disso, os teores de pectina removida foram avaliados. A amostra 01 oxidativa apresentou um teor de pectina de 48,61%, enquanto a amostra 02 enzimática exibiu um teor de 50,48%. O ideal seria uma remoção completa de pectina, correspondendo a 100%.

Diante disso, a presença de pectina residual pode demandar um reprocesso adicional, a fim de garantir a qualidade e eficiência do processo. Contudo, é importante ressaltar que o processo subsequente de alvejamento também pode ter a capacidade de remover o excesso de pectina residual durante a purga.

O resíduo de pectina em menor percentagem observada nesse teste pode ser um indicativo de que a causa de menor hidrofiliade observada no teste de hidrofiliade por capilaridade pode estar associada a um residual de ceras e graxas que pode ter permanecido no substrato têxtil. Como a lavagem final do processo de biopurga foi a baixas temperaturas, resíduos desses compostos podem ter permanecido, conforme Colombi e colaboradores (2021b) observaram quando testaram diferentes condições de enxágue final de processo de biopurga de malha.

Da mesma forma que ocorre com residual de amido no processo de desengomagem, pode estar ocorrendo com a purga. O uso de enzimas degrada efetivamente a molécula

reduzindo o seu tamanho e tornando-a solúvel, com conseqüente redução da possibilidade de redeposição sobre o substrato. Já nos processos químicos pode estar havendo uma solubilização sem efetiva diminuição de cadeia polimérica da pectina pelo efeito do pH e da temperatura dos processos oxidativos os quais ocorrem em pH em torno de 12 e temperatura de 90 °C, condições de solubilização de pectinas. Esse efeito pode justificar a melhor remoção de pectina observada nos tratamentos enzimáticos em comparação com o tratamento químico.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DO PRÉ-ALVEJAMENTO

##### 4.4.1 Avaliação do grau de brancura por espectrofotômetro

A avaliação do grau de brancura das amostras, após os processos de desengomagem, purga e alvejamento foi conduzida de acordo com a norma ASTM E313-15, utilizando o espectrofotômetro Datacolor 500, localizado no laboratório da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau.

Os ensaios foram conduzidos em duplicata, e cada leitura foi realizada em três pontos distintos da amostra. O grau de branco foi avaliado comparativamente com um padrão representado por um substrato alvejado por meio do processo oxidativo.

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos pelo espectrofotômetro na medição do grau de brancura em graus Berger e o percentual de refletância para as amostras que foram submetidas aos processos oxidativo e enzimático.

Tabela 10 - Avaliação do grau de branco em Espectrofotômetro de Graus Berger

Processo	Graus Berger	K/S Ondas em nm %R
Oxidativo	43,67	360 – 0,2000
		390 – 0,1218
		700 – 0,0087
Enzimático	49,09	360 – 0,1723
		390 – 0,0935
		700 – 0,0078

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os resultados demonstraram que a amostra tratada com o processo oxidativo obteve um grau de brancura de 43,67 graus Berger, enquanto a amostra tratada com o processo enzimático obteve 49,09 graus Berger. Esses valores indicam que o processo enzimático resultou em uma maior brancura na amostra, em comparação com o processo oxidativo. Essa melhora não foi apenas perceptível nos graus Berger, mas também se refletiu no percentual de refletância, validando ainda mais o resultado obtido. Importante ressaltar que ambas as abordagens resultaram em condições adequadas para prosseguir para os processos subsequentes.

A condição de processo de bioalveamento se dá pela produção do peróxido de hidrogênio *in loco*, ou seja, a enzima utiliza a glicose adicionada ao processo para a formação do composto. Esse processo mostrou que níveis de branqueamento atingidos bioquimicamente são suficientes a partir de uma produção de peróxido obtido de uma baixa concentração de enzima usando glicose oxidase (Shahid *et al*, 2016).

#### **4.4.2 Avaliação do comportamento tintorial**

Para avaliar a afinidade tintorial das amostras após serem submetidas a processos de coloração, foram conduzidas leituras comparativas entre os processos oxidativos e os bioprocessos. Essas avaliações foram realizadas em três concentrações de corantes, resultando em três tons distintos, conforme detalhado a seguir.

Após a etapa de coloração, as medições das cores foram realizadas por meio de um espectrofotômetro Datacolor 500 na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), permitindo comparações entre os processos enzimáticos e oxidativos convencionais.

Os resultados obtidos foram organizados e são apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13. As amostras referentes ao alveamento convencional oxidativo foram designadas pela letra "C", enquanto as correspondentes ao processo enzimático foram marcadas com a letra "E".

Utilizando as cores resultantes do processo oxidativo como padrão de referência e comparando-as com as cores obtidas em substratos alvejados com enzimas, observou-se padrões muito semelhantes, indicando que a afinidade tintorial desses dois substratos se comporta de maneira similar. Importante destacar que as amostras foram tingidas em três concentrações distintas de corante: 0,25%, 0,50% e 1,00%.

Tabela 11 - Resultados espectrofotômetro 0,25% de cor vermelho

COR	CIE De	FORÇA (%)
<b>Padrão oxidativo</b>		
 C 2	0,65	102,87
<b>Oxidativo C 3</b>	0,18	100,85
 E 2	0,08	99,51
<b>Enzimático E 3</b>	1,56	97,72

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 12 - Resultados espectrofotômetro 0,50% de cor vermelho

COR	CIE Da	FORÇA
<b>Padrão oxidativo</b>		
 C 2	0,65	95,31
<b>Oxidativo C 3</b>	0,48	97,12
 E 2	0,66	95,25
<b>Enzimático E 3</b>	1,14	97,78

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Tabela 13 - Resultados espectrofotômetro 1,00% de cor vermelho

COR	CIE Da	FORÇA
<b>Padrão oxidativo</b>		
 C 2	0,04	99,68
<b>Oxidativo C 3</b>	0,43	97,46
 E 2	1,10	92,72
<b>Enzimático E 3</b>	1,84	91,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A análise dos parâmetros de Força colorística, KS e delta E revelou diferenças mínimas entre os processos oxidativo e enzimático. Com base nessas medições, a intensidade das cores ficou muito próxima nos dois processos, não havendo uma distorção significativa nas tonalidades. Portanto, pode-se concluir que, para alcançar um equilíbrio nas tonalidades entre os dois processos, seria necessário ajustar a concentração de corantes nos substratos alvejados com enzimas.

#### 4.5 AVALIAÇÃO DO TESTE DE TRAÇÃO

A análise da resistência à tração dos tecidos, conforme apresentado na Tabela 14, revela que as diferenças entre os dois processos de pré-alvejamento não são particularmente evidentes. De forma geral, as médias de resistência entre os dois processos se mantiveram em padrões comparáveis e bem próximos entre si.

É de se notar que o coeficiente de variação é uma leitura a ser feita e de relevância quando avaliada, pois indica a variação da resistência nas amostras submetidas a testes. Neste caso, pode-se observar que no processo oxidativo, houve uma variação alta de 10,08% no urdume, enquanto na trama essa variação foi baixa, de 3,494%. No processo enzimático, a variação foi de 5,831% na trama e 6,026% no urdume, ficando equilibrada. Esses resultados indicam que o processo enzimático evita ou reduz a possibilidade de alterações na resistência do substrato, pois apresenta variações menores em comparação com o processo oxidativo. A diferença entre trama e urdume se deve ao fato de que a extração da goma na desengomagem ocorre principalmente no fio de urdume, que interage em maior proporção com os agentes químicos utilizados no processo.

Tabela 14 - Comparativo da resistência de tração entre os dois processos de alvejamento

<b>CORPO DE PROVA</b>	<b>TRAMA OXIDATIVO</b> Força em kgf	<b>URDUME OXIDATIVO</b> Força em kgf	<b>TRAMA ENZIMÁTICO</b> Força em kgf	<b>URDUME ENZIMÁTICO</b> Força em kgf
<b>Média</b>	34.90	34.56	33,49	36.03
<b>Desv. Padrão</b>	1.219	3.486	1.953	2.171
<b>Coef. Var. (%)</b>	3.494	10.08	5.831	6.026
<b>Mínimo</b>	33.10	29.34	31.01	33.24
<b>Máximo</b>	36.17	38.05	36.31	39.09

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

#### 4.6 AVALIAÇÃO FINANCEIRA DOS PROCESSOS

O uso de enzimas sempre teve restrições devido aos custos associados ao processo. A fim de melhor compreender essa afirmação, foi realizada uma análise financeira para avaliar os custos industriais do bioprocessamento em comparação com os métodos de beneficiamento convencionais aplicados neste estudo.

A Tabela 15 fornece uma comparação de custos entre os dois processos, considerando apenas os custos de vapor, agentes químicos e enzimas.

Tabela 15 - Comparativo de custos entre processo oxidativo e enzimático

	°C	Tempo min.	M <sup>3</sup> vapor	R\$ vapor	R\$/kg de tecido	R\$ químicos	R\$ enzimas	Custo processo
<b>Processo Oxidativo</b>								
<b>Desngomagem</b>	95	60	156	33,32	0,27	64,80	--	98,12
<b>Purga</b>	95	45	156	33,32	0,70	168,00	--	201,32
<b>Pré-alvejamento</b>	95	80	156	33,32	0,75	180,00	--	213,32
<b>Total</b>		185	468	99,96		412,80	--	<b>512,76</b>
<b>Processo enzimático</b>								
<b>Biodesngomagem</b>	80	30	121	25,84	0,045	--	10,80	36,64
<b>Biopurga</b>	70	30	107	22,85	0,171	--	41,04	63,89
<b>Bioalvejamento</b>	40	40	33	7,04	0,437	--	104,88	111,92
<b>Pré-alvejamento</b>	95	20	124	26,48	--	--	--	26,48
<b>Total</b>		120	385	82,21	--	--	156,72	<b>294,66</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Os valores apresentados na tabela anterior para agentes químicos, enzimas e vapor foram calculados considerando uma quantidade de substrato de 240 kg em uma relação de banho de 1/10. Esses valores refletem os custos disponíveis no mercado têxtil e proporcionam uma representação precisa dos custos associados aos processos têxteis. Vale ressaltar que esses custos estão relacionados apenas aos produtos utilizados em cada processo, sem considerar outros fatores como mão de obra, consumo de energia elétrica, depreciação, entre outros.

Além disso, é fundamental considerar custos intangíveis, como os impactos ambientais e sociais relacionados ao uso de compostos químicos com elevado pH. Isso inclui a necessidade de maior consumo de energia, muitas vezes proveniente de fontes como cavacos de madeira, lenha ou gás natural, o que pode resultar em uma maior emissão de poluentes atmosféricos. Também é importante destacar os riscos ambientais associados a possíveis acidentes, que já foram observados em indústrias, como vazamentos ou transbordos em estações de tratamento de efluentes de empresas têxteis, bem como acidentes envolvendo substâncias químicas e outros incidentes relacionados à segurança industrial.

A análise dos valores evidencia que os processos que utilizam rotas enzimáticas apresentam custos inferiores em comparação com os processos convencionais que fazem uso de agentes químicos.

No que concerne aos aspectos sociais, é importante destacar a baixa toxicidade dos compostos empregados nos bioprocessos, o que resulta em menores riscos para a comunidade circundante à indústria têxtil quando o processo é conduzido com a assistência de catalisadores enzimáticos.

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo foi conduzido com o objetivo geral de desenvolver um processo eficiente, economicamente viável e ecologicamente sustentável para substituir os processos convencionais de preparação de tecidos de algodão nas etapas de desengomagem, purga e pré-alveamento, ou seja, em um tripé, econômico, viável e sustentável.

Os resultados demonstraram que os processos enzimáticos exibiram uma eficiência superior em termos de qualidade do produto e eficiência de recursos, atendendo plenamente ao objetivo geral da pesquisa.

Os objetivos específicos do estudo buscaram identificar as condições de trabalho ideais para as enzimas,  $\alpha$  amilase, pectinase e glucose oxidase (GOx), na preparação de tecidos de algodão. Foi revelado que as enzimas operam de maneira eficaz até uma concentração de 0,25 g/L na biodesengomagem. Além disso, foram feitas tentativas de realizar a biodesengomagem, biopurga e bioalveamento em um único banho, embora o bioalveamento simultâneo não ocorreu conforme planejado originalmente, indicando a necessidade de mais pesquisas para otimizar este procedimento.

Para verificar as condições de trabalho das associações de enzimas para um processo de banho único, a pesquisa recorreu a análises de teor residual de amido, hidrofiliidade e grau de brancura do substrato após o tratamento enzimático. Os resultados indicaram que o processo enzimático conseguiu um nível superior de hidrofiliidade em comparação com o procedimento convencional, cumprindo, assim, outro dos objetivos específicos do estudo.

Finalmente, as amostras tratadas com o bioprocessos foram tingidas em diferentes concentrações de corante. As amostras apresentaram desvios de cor comparáveis às dos tecidos preparados por processos químicos, demonstrando a viabilidade do processo enzimático.

Assim, conclui-se que os processos enzimáticos atingiram a maioria dos objetivos traçados, oferecendo uma alternativa viável e mais eficiente aos métodos convencionais. Em relação aos desafios identificados, a pesquisa sugeriu a necessidade de estudos adicionais para otimizar o bioalveamento simultâneo. A realização desses estudos futuros poderá fornecer perspectivas valiosas para a aplicação bem-sucedida dos processos enzimáticos na indústria têxtil, contribuindo para a realização do objetivo geral deste estudo de desenvolver um processo eficiente, economicamente viável e ecologicamente sustentável para a preparação de tecidos de algodão.

Com relação a custos do bioprocesso têxtil, a pesquisa demonstrou uma diferença da ordem de 55 % menor em relação ao consumo de vapor e agentes químicos quando comparado com os processos convencionais. Demonstrando que no quesito financeiro o bioprocesso também é vantajoso.

Além de ser ecologicamente correto, o processo enzimático causa menos danos químicos à fibra do algodão em comparação com o processo convencional, pela sua especificidade o que diminui ação sobre a celulose, o composto estruturante da fibra.

Para futuras pesquisas na área de bioprocessos têxteis, é recomendável considerar o uso de máquinas que permitam a aeração ou injeção de oxigênio, com o objetivo de aumentar a geração de peróxido de hidrogênio *in situ* durante o processo. Isso pode representar um avanço significativo nessas pesquisas.

## REFERÊNCIAS

- ANAND, Gautam; YADAV, Sangeeta; GUPTA, Rupali; YADAV, D. 14 - **Pectinases: from microbes to industries**. In: Chowdhary, P. *et al.* (Eds.). . [s.l.] Elsevier, 2020. p. 287–313.
- BESEGATTO, S.V.; COSTA, F.N.; DAMAS, M.S.P.; COLOMBI, B.L.; ROSSI, A.C.D; AGUIAR, C.R.L.D; IMMICH, A. P. S. **Enzyme Treatment at Different Stages of Textile Processing: A Review**. 2018.
- CHIBATA, By Ichiro; TOSA, Tetsuya; TAKAMATSU, S. **Continuous L-Alanine Production Using Two Different**.pdf. In: [s.l: s.n.]. p. 472–479.
- CHOUDHURY, A. K. R. **Sustainable Textile Wet Processing: Applications of Enzymes**. In: [s.l: s.n.].
- CHOUDHURY, A. R. **Pre-treatment and preparation of textile materials prior to dyeing**. In: [s.l: s.n.]. p. 64–149.
- COLOMBI, Bruna Lyra; PALOZI, Marlon David; VALLE, Rita de Cássia Siqueira Curto; ANDREAUS, Jürgen; ARIAS, Manuel José Lys; VALLE, J. A. B. **A sustainable approach for cotton bioscouring: reuse of the pectate lyase containing treatment bath**. 2022.
- DOCHIA, M.; SIRGHIE, C. **Cotton fibers**.pdf, 2012.
- FERRANTE, E. **Biotecnologia Aplicada à Indústria Têxtil**. 2011.
- FREITAS, Andreia Andrade de; FRANCELIN, Maria Fernanda; HIRATA, Gláucia Freitas; CLEMENTE, Edmar; SCHMIDT, F. L. **Atividades das enzimas peroxidase (POD) e polifenoxidase (PPO) nas uvas das cultivares benitaka e rubi e em seus sucos e geléias**. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2008.
- GAILO, I. **Avaliação da atividade de pectinases comerciais imobilizadas e submetidas ao tratamento com gás liquefeito de petróleo**, 2016. (Nota técnica).
- GORDON, S.; HSIEH, D Y.-L. **Cotton: Science and technology**. Cambridge, England: [s.n.].

GUSMÃO, N. N. **A qualidade na indústria têxtil, da tecelagem ao vestuário: estudo de casos múltiplos em pequenas e médias empresas no estado de São Paulo.** 2008.

HALIM, E. S. A; AL-DEYAB, S. S. **One-step bleaching process for cotton fabrics using activated hydrogen peroxide** *Carbohydrate Polymers*, 2013.

HSIEH, Y. L. **Chemical structure and properties of cotton.** In: GORDON, S. AND HSIEH, Y.-L. (Ed.). *Cotton: Science and Technology.* Cambridge/UK: Woodhead Publishing Limited, 2006. p. 3–34.

IBGE. **Projeção da Abit para o setor têxtil em 2021 se assemelha ao ano de 2019.**

KAMIMURA, G. K. F. **Isolamento, purificação e caracterização da peroxidase de Yacon (*Smallanthus sonchifolius*).** 2006.

KARMAKAR, S. R. **Chemical technology in the pre-treatment process of textiles.** 12. ed. Amsterdam: [s.n.].

KLEIN, Janaina Alves; JR, Miguel Petrere; DAVI, Gomes Butturi; BARRELLA, W. **Textile sustainability: A Brazilian etiquette issue.** *Environmental Science & Policy*, v. 109, p. 125–130, 2020.

KUMAR, R. S. **Process Management in Spinning.** Londres: [s.n.].

LASPIDOU, Chrysi S.; MELLIOS, Nikolaos K.; SPYROPOULOU, Alexandra E.; KOFINAS, Dimitrios TH.; PAPADOPOULOU, M. P. **Systems thinking on the resource nexus: Modeling and visualisation tools to identify critical interlinkages for resilient and sustainable societies and institutions.** *Science of the Total Environment*, v. 717, p. 137264, 15 maio 2020.

LIMA, J. de S. **Imobilização de celulase em caulim e sua aplicação em processos de acabamento têxtil.** p. 5–24, 2020.

MARCH, A. . **Beneficiamento têxtil na prática.** 1ª ed. São Paulo: [s.n.].

MELO, C. G. **Otimização do tingimento de algodão com o corante Reactive Blue 21 e tratamento do respectivo efluente têxtil com acelerador de elétrons para a redução da cor e dos efeitos tóxicos agudos.** Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, p. 134f, 29 jun. 2022.

MENESES, I. C. **Enzimas catalisadoras.pdf.** In: [s.l: s.n.]. p. 20–29.

MOJSOV, K. **Application of enzymes in the textile industry: a review.** 2011

MONTERIRO, Valdirene N.; SILVA, R. Do N. **Processos Químicos. Revista científica da Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Mange**, v. 3, n. 5, p. 9–23, 2009.

MORAES, Caroline da Silva; JUNIOR, Francisco Odencio Rodrigues de Oliveira; MASSON, Gustavo; REBELLO, Karina Mastropasqua; SANTOS, Livia de Oliveira; BASTOS, Naraya Fazolini P.; FARIA, R. C. R. **Métodos experimentais no estudo de proteínas.** [s.l: s.n.].

NASSIMA, Moussaoui; NADJET, Mekaouche; HABIBA, Fettati; ESSMA, S. CA-100 - **Papel da  $\beta$ -arrestina 1 na preservação da função e massa das células  $\beta$  pancreáticas in vivo.** 2017

NEGM, Mohamed; SANAD, S. **Cotton fibres, picking, ginning, spinning and weaving.** Cotton Research Institute, Giza, Egypt, v. 1, p. 48, 2020.

OLIVEIRA, Carlos Rafael Silva de; JÚNIOR, Afonso Henrique da Silva; MULINARI, Jéssica; IMMICH, Ana P. S. **Textile Re-Engineering: Eco-responsible solutions for a more sustainable industry.** <https://www.sciencedirect.com/journal/sustainable-production-and-consumption>, p. 1232–1248, 2021.

PEETS, Pillerin; LEITO, Ivo; PELT, Jean; VAHUR, SI. **Identificação e classificação de fibras têxteis usando espectroscopia ATR-FT-IR com métodos quimiométricos.pdf.** In: Spectrochimica Acta. Tõravere Estonia: [s.n.]. p. 175–181.

PERFEITO, M. W. **Avaliação do efeito da inibição da celulase no biopolimento de substrato de algodão.** 2012.

PIMENTEL, A. **Caracterização de uma pectinase comercial e sua utilização no processo de purga da indústria têxtil,** 2010.

POOJA KOHLI, R. G. **Alkaline pectinases: a review**. In: Shimla: [s.n.].

RAHMAN, M. *et al.* **Bio-based textile processing through the application of enzymes for environmental sustainability**. International Journal of Technology Management and Sustainable Development, v. 19, n. 1, p. 87–106, 1 mar. 2020.

REIS, C. Z. **Bioalvejamento enzimático de tecidos de malha de algodão**. Tese de Doutorado, p. 172, 2016.

RESEARCH, G. V. **Relatório de análise de tamanho, participação e tendências do mercado têxtil por matéria-prima (algodão, lã, seda, química), por produto (fibras naturais, náilon), por aplicativo (técnico, moda), por região e previsões de segmento, 2022 - 2030**. San Francisco: [s.n.].

RESEARCH, G. V. **Enzymes Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Industrial Enzymes, Specialty Enzymes), By Product (Carbohydrase, Proteases, Lipases), By Source, By Region, And Segment Forecasts, 2020 - 2027** (<https://www.marketsandmarkets.com/Privac.-12.htm>. em 12/07/2023, Ed.). San Francisco: [s.n.].

SCHIRO, T. N. . *et al.* **Bioengineering textiles across scales for a sustainable circular economy**. Chem, v. 7, n. 11, p. 2913–2926, 11 nov. 2021.

SHARMA, Nirmal; BHARDWAJ, Nishi K; SINGH, R. B. P. **Environmental issues of pulp bleaching and prospects of peracetic acid pulp bleaching: A review**. Journal of Cleaner Production, v. 256, p. 120338, 2020.

SHEN, J; SMITH, E. **Enzymatic treatments for sustainable textile processing**. Woodhead Publishing Series em Têxteis. [s.l: s.n.].

SOUSA, D. R. T. de. **Produção de Glicose Oxidase (E.C. 1.1.3.4) por fungos isolados da Floresta Amazônica**. 2017.

TONIOLO, Michele; ZANCAN, Natalia Piva; WUST, C. **Indústria têxtil, sustentabilidade, impactos e minimização**.pdf. 2015

TWARDOKUS, R. G. **Reuso de água no processo de tingimento da indústria têxtil.** Universidade Federal de Santa Catarina, p. 136, 2004.

TZNOV, Tzanko; CALAFELL, Margarita; GUEBITZ, Georg M.; PAULO, A. C. **Bio-preparation of cotton fabrics.** p. 357–362, 2001.

USLUOGLU, AYSE; ARABACI, G. **Bleaching of Cotton/polyamide fabrics with enzymes and peracetic acid.** Asia-pacific journal of chemical engineering, p. 364–367, 2014.

WANG, Qiang; FAN, Xuerong; HUA, Zhaozhe; GAO, Weidong; CHEN, J. **Degradation kinetics of pectins by an alkaline pectinase in bioscouring of cotton fabrics.** Carbohydrate Polymers, v. 67, n. 4, p. 572–575, 2007.

## ANEXO

Figura 29 - Valores empíricos de consumo de vapor na indústria têxtil

Consumo de vapor quando aquecido 1 m <sup>3</sup> de água da temperatura 1 (T1) para a temperatura 2 (T2)		em máquinas fechadas																											
T2 (para)		20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140			
T1 (de)		kg de vapor																											
6		23	31	40	48	57	66	75	84	93	102	112	121	131	141	151	161	171	181	191	202	213	224	236	247	259			
20	-	8	17	25	34	43	52	61	70	79	89	99	108	118	128	138	148	159	169	179	190	201	213	224	236				
25	-	-	8	17	26	35	44	53	62	71	80	90	100	110	120	130	140	150	161	171	182	193	204	216	220				
30	-	-	-	9	18	27	35	44	54	63	72	82	92	101	111	121	131	142	153	163	174	185	196	208	220				
35	-	-	-	-	9	18	27	36	45	55	64	73	83	93	103	113	123	133	144	155	165	176	188	199	211				
40	-	-	-	-	-	10	18	27	37	46	56	65	75	84	94	104	114	125	136	146	157	168	179	191	202				
45	-	-	-	-	-	-	10	19	28	37	46	56	66	76	86	96	106	116	127	138	148	159	170	182	194				
50	-	-	-	-	-	-	-	10	20	29	38	47	57	67	77	87	97	107	118	129	140	151	162	174	185				
55	-	-	-	-	-	-	-	-	11	20	29	39	49	59	69	79	89	99	109	120	131	142	153	165	177				
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	21	30	40	50	60	70	80	90	101	111	122	133	144	156	160				
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	21	31	41	51	61	71	81	91	102	113	124	136	147	159				
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	22	32	42	52	62	73	83	93	104	115	127	139	150				
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	23	33	43	53	63	74	84	95	106	118	129	141				
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	24	34	44	54	64	75	86	97	100	120	132				
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	25	35	45	56	66	77	88	99	111	123				
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	26	36	47	57	68	79	90	102	113				
95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16	27	37	48	59	70	81	92	104				
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	28	38	49	60	71	83	94				
kg/h para manter T constante		2	3	5	7	9	10	12	14	16	17	19	21	23	24	26	32	29	31	33	35	36	38	40	41				

Nota: Consumo de vapor incluindo perdas de calor de 3% e outras perdas 2%. Pressão de vapor 5 kgf/cm<sup>2</sup>

Fonte: Arquivo pessoal Fred Otte.