



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CAMPUS BLUMENAU

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÊXTIL

CURSO DE ENGENHARIA TÊXTIL

LAURA ANTUNES GRIMM

**ESTUDO DA REMOÇÃO DE PECTINA AO LONGO DO TEMPO DO PROCESSO
DA BIOPREPARAÇÃO DE MALHA DE ALGODÃO**

BLUMENAU

2024

LAURA ANTUNES GRIMM

**ESTUDO DA REMOÇÃO DE PECTINA AO LONGO DO TEMPO DO PROCESSO
DA BIOPREPARAÇÃO DE MALHA DE ALGODÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Têxtil do Campus Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a. Rita de Cássia Siqueira Curto Valle

Coorientador(a): Dr.^a. Bruna Porto

Blumenau

2024

Laura Antunes Grimm

Estudo da remoção de pectina ao longo do tempo do processo da biopreparação de malha de algodão

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Têxtil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Têxtil.

Blumenau, 25 de outubro de 2024.

Insira neste espaço

a assinatura

Prof.^a Grazyella Cristina Oliveira de Aguiar, Dr.(a)
Coordenação do Curso

Banca examinadora

Insira neste espaço

a assinatura

Prof.(a) Rita de Cássia Siqueira Curto Valle, Dra.
Orientador(a)

Insira neste espaço

a assinatura

Prof.(a) Catia Rosana Lange de Aguiar, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Insira neste espaço

a assinatura

Prof.(a) Andrea Cristiane Krause Bierhalz, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Blumenau, 2024

Aos meus pais, *in memoriam*. Agradeço por todo o amor, ensinamentos e os valores que me guiaram até aqui. Sinto sua presença em cada conquista e, especialmente, nesta.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Universo/Deus pela oportunidade de viver neste planeta cheio de possibilidades, cercada de pessoas inspiradoras, e pela chance de evoluir e me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço imensamente a família dos meus tios pelo acolhimento, especialmente após o falecimento dos meus pais e avó, por serem meu lar e porto seguro. Em especial, à minha tia Loni, que segurou minha mão em momentos que eu já havia desistido de mim mesma. Apesar de ser mais razão do que emoção, ela sempre me ensinou a ver o lado positivo em tudo. Ao meu tio Fernando, por sua paciência infinita ao me explicar Física, Cálculo e Estatística, quantas vezes fosse necessário, e por nunca deixar de acreditar no meu potencial.

À minha psicóloga, Viviane Giombelli, agradeço por me ajudar a compreender melhor quem sou, acolher minhas emoções e estar ao meu lado em todos os momentos, tanto os felizes quanto os difíceis. Sua orientação foi fundamental nessa jornada.

Ao meu namorado, Felipe Thives, que esteve ao meu lado nos melhores e piores momentos, sempre me apoiando, acalmando e sendo a pessoa mais gentil que eu poderia desejar. Você fez todos os momentos valerem a pena. Sem você, nada teria a mesma graça.

À minha querida orientadora, professora Rita de Cássia Siqueira Curto Valle, sou profundamente grata por todo o carinho, contribuições e pela confiança que depositou em mim. Sua crença no meu potencial foi essencial para que eu pudesse ir além.

Aos meus colegas, amigos que fiz ao longo destes anos, em especial à Melissa, Clara, Aline, Helen, Flavia, agradeço a amizade e companhia. Vocês tornaram essa trajetória mais leve e divertida.

Meu reconhecimento também vai para os pesquisadores do LABMAM, pelo apoio e carinho. Em especial, agradeço à pós-doutoranda Bruna Porto, por seus conselhos, incentivo e pela ajuda inestimável na conclusão deste trabalho. Sua presença foi essencial para meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos professores que me acompanharam ao longo do curso, sou grata pela dedicação, paciência e pelo incansável esforço em proporcionar o máximo de aprendizado e conhecimento.

À Universidade Federal de Santa Catarina, agradeço a estrutura, apoio e acolhimento, fornecidos através de seus professores, técnicos e demais funcionários. Ao longo desses anos, a universidade se tornou minha segunda casa.

*“Not all those who wander
are lost.”*
(J.R.R. Tolkien)

RESUMO

A busca por alternativas sustentáveis na indústria têxtil tem impulsionado o uso de processos biotecnológicos, como a biopurga enzimática, que visa minimizar impactos ambientais associados aos métodos químicos convencionais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a remoção de pectina em malhas de algodão durante o processo de biopurga, utilizando pectinase em diferentes concentrações (0,9 g/L, 1,8 g/L e 2,8 g/L). O experimento foi realizado em shaker com agitação de baixa intensidade, sob temperatura constante de 55°C e pH 8,0, por um período de 45 minutos. Para isso, foram mensurados parâmetros como a atividade enzimática, a porcentagem de remoção de pectina e o ganho de capilaridade, correlacionando-os ao desempenho da enzima. Observou-se que, com o aumento da concentração de pectinase, houve uma remoção mais eficiente da pectina e um aumento na capilaridade, refletindo uma melhora significativa na hidrofiliabilidade das amostras. Além disso, verificou-se que o método aplicado apresenta limitações, especialmente quanto à homogeneidade da agitação e temperatura, o que influencia diretamente na remoção de pectina. Os resultados demonstram que a aplicação da pectinase, mesmo com a redução da atividade enzimática após 25 minutos, foi eficaz e viável para o processo de biopurga. Apesar disso, o processo demonstrou viabilidade prática, sendo uma alternativa sustentável para substituir os métodos convencionais mais agressivos na preparação de tecidos. O controle adequado das variáveis operacionais é essencial para a otimização do processo e sua adaptação em escala industrial.

Palavras-chave: Biopurga de algodão, pectinase, atividade enzimática.

ABSTRACT

The search for sustainable alternatives in the textile industry has driven the adoption of biotechnological processes, such as enzymatic bioscouring, aiming to minimize the environmental impact associated with conventional chemical methods. This study aimed to evaluate pectin removal in cotton knits during the bioscouring process, using pectinase at different concentrations (0.9 g/L, 1.8 g/L, and 2.8 g/L). The experiment was conducted in a shaker with low-intensity agitation, at a constant temperature of 55°C and pH 8.0, over 45 minutes. Parameters such as enzymatic activity, the percentage of pectin removal, and capillarity gain were measured and correlated with the enzyme's performance. Results showed that increasing the pectinase concentration led to more efficient pectin removal and increased capillarity, significantly improving the samples' hydrophilicity. Additionally, the applied method revealed limitations, particularly in the homogeneity of agitation and temperature, which directly influenced pectin removal. The findings demonstrated that pectinase application, even with reduced enzymatic activity after 25 minutes, was effective and viable for the bioscouring process. Nevertheless, the process proved to be practically feasible, representing a sustainable alternative to replacing more aggressive conventional methods in fabric preparation. Proper control of operational variables is essential for optimizing the process and adapting it to an industrial scale.

Keywords: Bioscouring, pectinase, enzymatic activity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura das etapas da cadeia têxtil	17
Figura 2 – Microestrutura do algodão	18
Figura 3 – Etapas do beneficiamento	20
Figura 4 – Gráfico do processo de purga convencional	21
Figura 5 – Modelo chave-fechadura	22
Figura 6 – Esquema do ensaio de biopurga	27
Figura 7 – Esquema das etapas para a determinação da atividade enzimática das alíquotas do banho biopurga	29
Figura 8 – Representação do teste de hidrofiliade	31
Figura 9 – Amostras submetidas ao teste de capilaridade	32
Figura 10 – Gráfico da atividade enzimática para as três concentrações de pectinase estudada	32
Figura 11 – Porcentagem de pectina residual	34
Figura 12 – Hidrofiliade das biopurgas	36
Figura 13 – Capilaridade das biopurgas	37

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ART	Açúcares Redutores Totais
DNS	Ácido 3,5-dinitrossalícilico
LABMAM	Laboratório de Meio Ambiente
LABENE	Laboratório de Beneficiamento
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
U	Unidade de atividade enzimática

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL	14
1.1.1	Objetivos Específicos	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	INDÚSTRIA TÊXTIL	16
2.1.1	A fibra do algodão	17
2.2	PROCESSO PRODUTIVO DE BENEFICIAMENTO	19
2.2.1	Purga Convencional	20
2.3	ENZIMAS	22
2.3.1	Emprego de enzimas no beneficiamento têxtil	23
2.3.2	Pectinase	24
2.4	BIOPURGA DO ALGODÃO	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	MATERIAS	26
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	26
3.2.1	Biopurga	26
3.2.2	Determinação de açúcares redutores totais	27
3.2.3	Determinação da atividade da pectinase	28
3.3	ANÁLISES DAS AMOSTRAS DE TECIDO TRATADAS	30
3.3.1	Determinação da pectina residual	30
3.3.2	Hidrofilidade	30
3.3.3	Capilaridade	31
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1	ATIVIDADE ENZIMÁTICA DA PECTINASE.....	32
4.2	ANÁLISE DAS AMOSTRAS	33
4.2.1	Grau residual de pectina	33
4.2.2	Hidrofilidade	35
4.2.3	Capilaridade	37
5	CONCLUSÃO	39
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
	APÊNDICE A – CURVAS DE CALIBRAÇÃO	46

1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é uma das maiores consumidoras de recursos naturais, utilizando grandes volumes de água e produtos químicos para preparar fibras para o tingimento e acabamento. Por outro lado, o setor desempenha um papel relevante nos âmbitos econômico, social e cultural globalmente. Em 2022, a produção mundial de fibras têxteis atingiu 116 milhões de toneladas (Textile Exchange, 2022), com as fibras naturais, como o algodão, representando cerca de 27% desse total (Textile Exchange, 2022). O Brasil está entre os cinco maiores produtores de algodão, juntamente com países como China, Estados Unidos, Índia e Paquistão (Souza, 2022), e possui a cadeia têxtil mais completa do Ocidente, que abrange desde o cultivo de fibras até a produção final de tecidos e um forte setor de varejo (ABIT, 2022).

Dentre as fibras naturais, o algodão destaca-se como a mais utilizada globalmente devido à sua abundância e propriedades desejáveis, como conforto e respirabilidade (Kumar et al., 2021). O algodão, amplamente utilizado na indústria têxtil, necessita de processos químicos para adequar suas propriedades ao uso, devido às impurezas naturais, como ceras, gorduras e pectina, que dificultam seu processamento industrial. Tradicionalmente, métodos químicos agressivos têm sido empregados para remover essas substâncias, resultando em altos custos ambientais, devido à produção de efluentes e resíduos tóxicos (Pandey et al., 2015).

Nos últimos anos, a busca por soluções mais sustentáveis tornou-se uma prioridade no setor têxtil. Neste contexto, como alternativa aos métodos tradicionais, o uso de enzimas surge como uma solução mais sustentável e eficiente, permitindo a remoção seletiva de impurezas presentes no algodão e minimizando o impacto ambiental (Buesa et al., 2015).

As enzimas desempenham papéis cruciais em diversos processos industriais têxteis. Entre suas funções mais relevantes, destacam-se: a redução de impurezas, o bioacabamento para aprimoramento estético, a remoção de fibrilas superficiais dos tecidos, o bioalveamento de jeans para obtenção de efeito envelhecido, e o branqueamento associado à eliminação do peróxido de hidrogênio residual pós-processo. Estas aplicações enzimáticas contribuem significativamente para a eficiência e qualidade dos produtos têxteis (Madhu e Chakraborty, 2017).

Enzimas biodegradáveis, utilizadas no processo de biopreparação, são empregadas para remover impurezas das fibras de algodão, como ceras e pectinas, responsáveis por suas características hidrofóbicas, preparando-as para etapas subsequentes, como tingimento e acabamento (Rocha, 2020).

A biopreparação de fibras têxteis é uma área de pesquisa promissora, oferecendo alternativas aos métodos químicos tradicionais e gerando benefícios como a redução no consumo de água e energia, além de minimizar o impacto ambiental e preservar as fibras (Colombi, 2021).

A biopurga enzimática, em particular, que utiliza enzimas específicas para remover as impurezas das fibras de algodão, mostrou-se uma alternativa promissora aos métodos químicos tradicionais, oferecendo benefícios como menor consumo de água, energia e menor geração de resíduos (Rana et al., 2021). Além disso, o uso de enzimas pode preservar melhor as propriedades mecânicas das fibras, resultando em um produto de maior qualidade e evitar a geração de subprodutos tóxicos, promovendo a sustentabilidade dentro da cadeia produtiva têxtil (Cavaco-Paulo & Gübitz, 2003).

Este trabalho propõe um estudo cinético da remoção enzimática de pectina nas fibras de algodão, por meio de processos de biopurga. A pesquisa visa contribuir para o aprimoramento dos processos de biopurga, avaliando aspectos como a eficiência na remoção de pectina, a qualidade do tratamento e o potencial de reutilização das enzimas. Com base nos dados cinéticos obtidos, espera-se que este estudo auxilie o desenvolvimento de processos industriais mais sustentáveis e eficientes na preparação de algodão para a indústria têxtil.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo geral avaliar a remoção de pectina em biopurga de algodão por via enzimática, considerando a influência de diferentes variáveis operacionais na remoção de pectina.

1.1.1 Objetivos Específicos

- a) Estudar a influência da concentração de enzima e tempo de reação, na remoção de pectina em amostras de malha de algodão.
- b) Determinar a atividade da enzima estudada durante o processo de biopurga.
- c) Avaliar o ganho de capilaridade ao longo do tratamento enzimático das malhas de algodão.
- d) Determinar a concentração ideal de enzima para maximizar a eficiência de remoção de pectina, melhorando assim a hidrofiliabilidade da malha.

1.2 JUSTIFICATIVA

Uma das principais motivações deste estudo é a identificação de uma lacuna na pesquisa sobre a cinética da biopurga. O objetivo foi investigar o comportamento da remoção de pectina ao longo do tempo, sob temperatura constante, a fim de compreender as dinâmicas envolvidas no processo. Esta avaliação permitirá otimizar o processo, aumentando assim a sua eficiência e viabilidade econômica, uma vez que se vislumbra minimizar o tempo de reação.

Neste contexto, utiliza-se a pectinase, uma enzima que catalisa a degradação da pectina, um polissacarídeo complexo presente na cutícula e nas paredes primária das fibras de algodão. A pectinase age rompendo as ligações de pectina, facilitando a remoção de impurezas hidrofóbicas e aumentando a hidrofilidade das fibras, o que melhora sua capacidade de absorção e uniformidade em processos subsequentes, como tingimento. Além de ser uma opção eficaz, apresenta um custo competitivo no mercado de bioprocessos, justificando economicamente sua aplicação no tratamento enzimático (Uenojo; Pastore, 2007).

Além disso, atualmente, a indústria têxtil está enfrentando uma crescente pressão para adotar práticas mais sustentáveis, principalmente, devido ao aumento da degradação ambiental e desperdício de recursos naturais pelo emprego de materiais e processos altamente agressivos. Nesse contexto, a utilização de enzimas na preparação de fibras emerge como uma estratégia necessária, uma vez que oferece a possibilidade de reduzir o consumo de produtos químicos, água e energia, contribuindo assim para a criação de um cenário mais ecoeficiente na indústria têxtil.

Portanto, este estudo busca contribuir com o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na indústria têxtil e com o avanço da pesquisa na área de bioprocessos e biotecnologia. Ao avaliar a remoção de pectina e ampliar o entendimento sobre o efeito do tempo no processo de biopurga enzimática de fibras têxteis, espera-se colaborar para a aplicabilidade deste processo no âmbito industrial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será explorada a base teórica do tema em estudo, elucidando-se os conceitos e informações essenciais para compreensão. Inicialmente, será apresentada uma breve explicação sobre a indústria têxtil e sobre o algodão. Em seguida, será dada ênfase a biopreparação na indústria têxtil, com especial atenção para a biopurga. E por fim, serão discutidos sobre as enzimas e os reagentes utilizados na biopurga, como pectinase e surfactante.

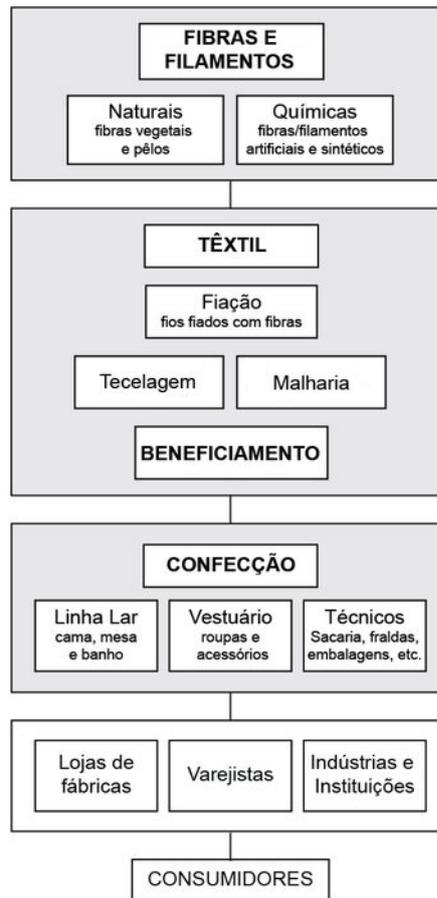
2.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil é um setor de grande importância econômica e histórica, com uma cadeia produtiva complexa que abrange desde o processamento de fibras até a confecção de produtos finais. Com raízes que remontam à Revolução Industrial, essa indústria tem evoluído continuamente, impulsionada por inovações tecnológicas e pela crescente demanda global por vestuário e outros produtos têxteis (Sarkar, Johnson & Cohen, 2023).

O Brasil destaca-se nesse cenário como um dos maiores produtores globais de algodão, com uma cadeia produtiva robusta e verticalmente integrada. O país tem investido em tecnologias avançadas para aumentar a eficiência produtiva e, simultaneamente, tem sido um dos líderes em práticas sustentáveis na produção de algodão, utilizando sistemas de irrigação mais eficientes e reduzindo o uso de insumos químicos (RSD Journal, 2023).

A estrutura da cadeia produtiva têxtil e de confecção é complexa e envolve diversas etapas, desde a obtenção das fibras até a confecção e distribuição dos produtos finais. Cada etapa envolve processos específicos que contribuem para a transformação das matérias-primas em produtos acabados. Para ilustrar essa complexidade, a Figura 1 apresenta um diagrama das principais etapas desse processo (Figura 1).

Figura 1 - Estrutura das etapas da cadeia têxtil



Fonte: Adaptado de Macedo (2015).

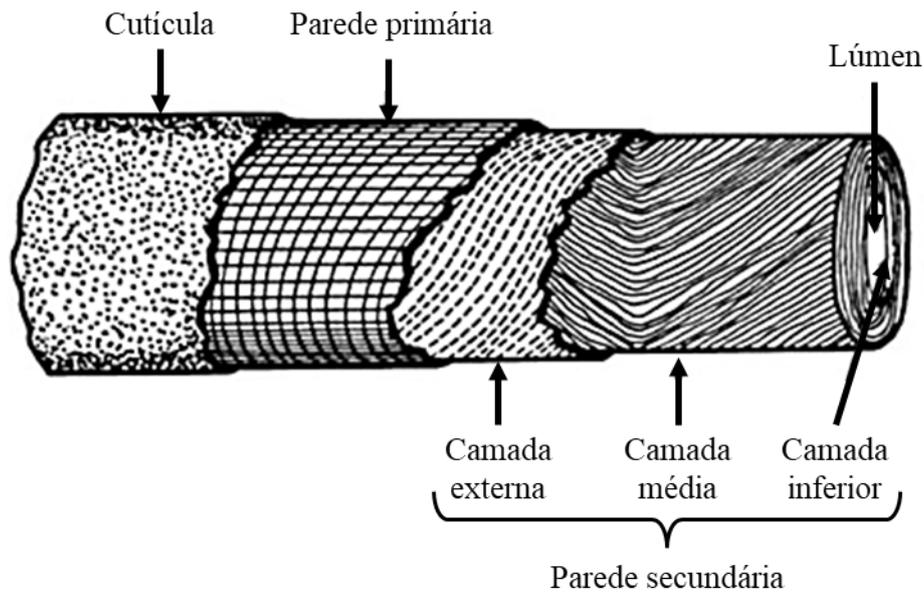
Apesar dos avanços tecnológicos e econômicos, a indústria têxtil enfrenta desafios significativos aos seus impactos ambientais. A produção têxtil requer grandes quantidades de água, combustíveis e produtos químicos. Por exemplo, a produção de 1 kg de algodão, necessita de aproximadamente 10.000 litros de água (Hill, 2019). Diante deste cenário, o alto consumo de recursos naturais tem levado a um debate global sobre a sustentabilidade da indústria e a necessidade de novas abordagens para minimizar os danos ambientais.

Em resposta a esses desafios, o uso de biotecnologias, como os processos enzimáticos, exemplifica como a indústria está se adaptando para reduzir o impacto ambiental gerado em seus processos fabris. As enzimas não apenas substituem produtos químicos agressivos, mas também contribuem para a redução do consumo de água e energia, além de minimizar a geração de efluentes tóxicos (Mojsov, 2019).

2.1.1 A fibra do algodão

O algodão desempenha um papel fundamental na indústria têxtil devido à sua versatilidade e às propriedades altamente desejáveis que possui. A fibra de algodão é predominantemente composta de celulose, hemicelulose e pectina, juntamente com outros elementos não fibrosos, como ceras e óleos em menor proporção (Akin, 2010).

Figura 2 – Microestrutura do algodão



Fonte: AMPA – IMAmt (2018).

A estrutura da fibra de algodão é complexa, composta por quatro camadas distintas: cutícula, parede primária, parede secundária e lúmen, conforme ilustrado na Figura 2. A cutícula, formada por ceras, proteínas e pectinas, é uma membrana fina e amorfa que protege o algodão contra danos ambientais e impede a penetração da água. A parede primária contém principalmente celulose e uma combinação complexa de pectinas, ceras, proteínas, cinzas e outros compostos orgânicos. Em contraste, a parede secundária, mais espessa, é composta por lamelas de celulose alinhadas de forma paralela e sobrepostas. O lúmen, um canal central, é preenchido por resíduos protoplasmáticos. (Mojsov, 2012).

As fibras maduras de algodão possuem uma forma característica de fitas planas e torcidas, o que facilita sua fiação (Wakelyn et al., 2006). A parede externa da fibra, conhecida como parede celular, composta por uma camada amorfa e delgada que representa cerca de 2,5% do peso total da fibra (Mojsov, 2012). Essa camada é formada por microfibrilas dispostas aleatoriamente em uma matriz que contém ceras, pectinas, proteínas e outros materiais não celulósicos, conforme apontado por Lewin (2007). Esses componentes não celulósicos

desempenham um papel crucial na aparência e nas propriedades da fibra, conferindo uma superfície hidrofóbica e lubrificada, o que facilita o processamento industrial (Li & Hardin, 1997).

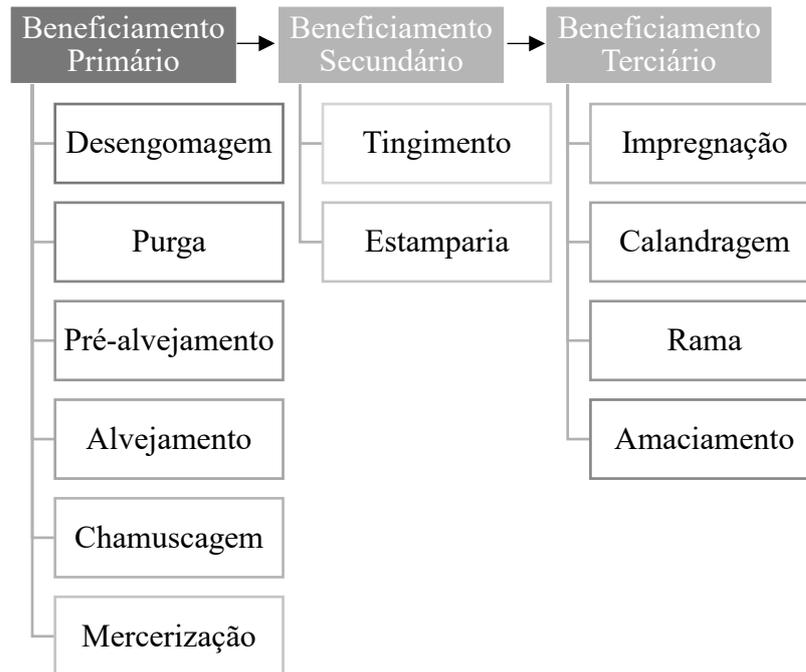
Além disso, a fibra de algodão contém proteínas, peptídeos, aminoácidos livres e nitrogênio não proteico. Esses componentes, que constituem o maior percentual de impurezas nitrogenadas no algodão bruto, ocorrem principalmente no lúmen da fibra como resíduo protoplasmático e, em menor quantidade, na parede primária (Wakelyn et al., 2006). Durante o beneficiamento, essas impurezas podem ser convertidas em compostos solúveis e removidas por ebulição com álcalis (Karmakar, 1999).

A pectina, presente na cutícula e na parede celular primária, atua como um gel de preenchimento, funcionando como uma "cola biológica" que mantém a estrutura celular unida (Mojsov, 2012). Esse polímero de cadeia longa, com um grau de polimerização de 200 a 400, contém até dezessete diferentes monossacarídeos em sua estrutura química (Colombi, 2021). É uma das macromoléculas naturais mais complexas, com alta massa molecular, insolúvel em água, mas solúvel em soluções alcalinas. Quando hidrolisada, a pectina gera ácido galacturônico, cuja remoção durante o processamento melhora a hidrofiliabilidade das fibras, permitindo uma absorção mais eficaz de água e corantes nos tratamentos subsequentes. Esse aumento na hidrofiliabilidade contribui para uma coloração mais uniforme e maior qualidade final do tecido (Hardin, 2010; Colombi, 2021).

2.2 PROCESSO PRODUTIVO DE BENEFICIAMENTO

O processo de beneficiamento pode ser entendido como uma sequência de etapas que visa a melhorar os aspectos estéticos e físico-químicos dos tecidos, fibras e fios. Ele pode ser dividido em três etapas, conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Etapas do beneficiamento



Fonte: Adaptado de Chaim (2014).

O beneficiamento primário agrega processos físicos, químicos e bioquímicos visando a eliminação de impurezas dos substratos têxteis, preparando-os para os processos de tingimento e estamparia. Esses processos podem ser divididos em operações a seco, como a navalhagem e a chamuscagem, e a úmido, como a desengomagem, purga e alveamento (Vigo, 1994).

Entre os processos de beneficiamento primário, destaca-se a purga alcalina, que é amplamente empregada, sendo responsável por remover substâncias não celulósicas presentes, como ceras e pectinas, que cobrem a superfície da fibra. A remoção de elementos não celulósicos, como ceras, gorduras, pectina, proteínas e ácidos orgânicos, é essencial para alcançar a hidroflicidade desejada no beneficiamento do algodão (Santana et al., 2001).

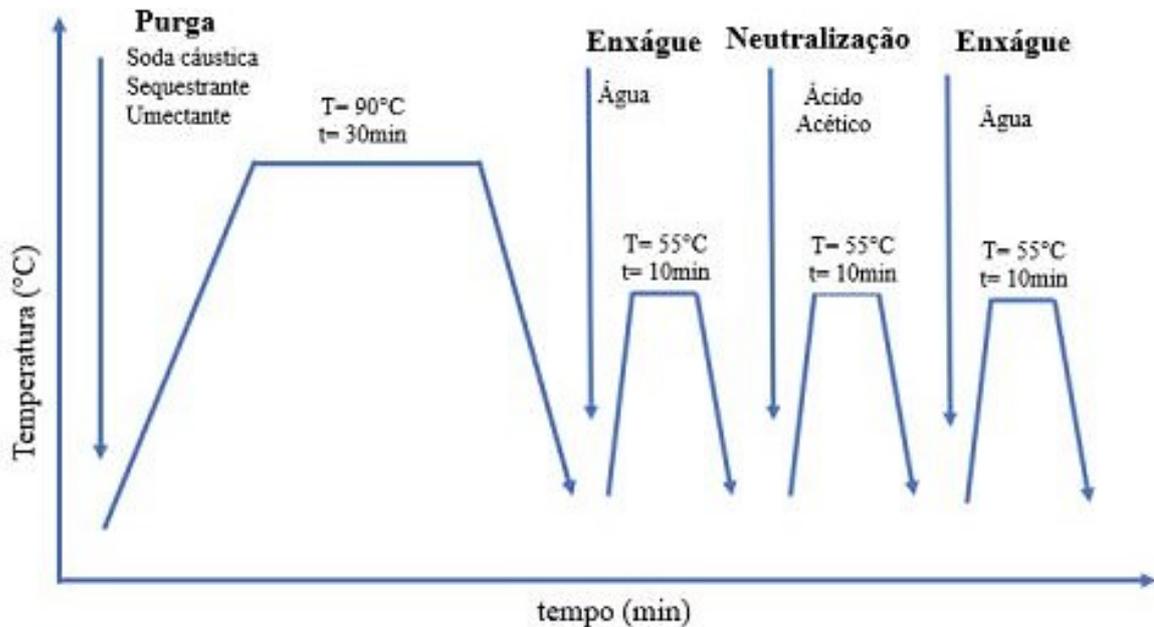
2.2.1 Purga Convencional

A purga convencional utiliza soluções alcalinas, geralmente contendo hidróxido de sódio ou carbonato de sódio, para saponificar e emulsificar substâncias graxas. Produtos auxiliares, como sequestrantes, detergentes, dispersantes e umectantes, são adicionados para remover impurezas, melhorar a absorção e estabilizar o processo químico (De Aguiar, 2022).

O processo convencional ocorre em temperaturas entre 70 °C e 100 °C e pH 13-14, com duração aproximada de uma hora. O uso de agentes redutores durante o tratamento evita a

oxidação da celulose em ambientes de pH elevado, enquanto agentes quelantes removem íons metálicos, como cálcio e ferro, que poderiam interferir no processamento (Einschlag, 2011; Agrawal, 2005). Após a purga, etapas de enxágue e neutralização são fundamentais para eliminar resíduos químicos. O processo pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Gráfico do processo de purga convencional



Fonte: Defalco, 2022.

Embora amplamente utilizado por sua eficácia e baixo custo relativo, devido ao uso do hidróxido de sódio, o método apresenta limitações significativas. Demanda grandes quantidades de produtos químicos, água e energia, gerando custos elevados e implicações ambientais. A necessidade de neutralizar águas residuais com ácidos aumenta a complexidade do processo, enquanto a degradação não específica da celulose pode comprometer a resistência e qualidade do tecido (Agrawal et al., 2007; Vigo, 1994).

Diante dessa problemática, o uso de enzimas no beneficiamento primário do algodão tem ganhado destaque como uma alternativa mais sustentável ao processo químico convencional. Enzimas, como pectinases, cutinases e amilases, são capazes de degradar as impurezas presentes nas fibras de algodão sem atacar a celulose, seu principal constituinte (Mojsov, 2019). Dessa forma, o uso de enzimas, em conjunto com surfactantes não iônicos, permite a remoção eficiente das impurezas a temperaturas mais baixas, entre 40°C e 60°C, resultando em uma economia significativa de energia e água (Sawada et al., 2008). Segundo Sawada et al. (2008), o uso de surfactantes não iônicos em combinação com as enzimas

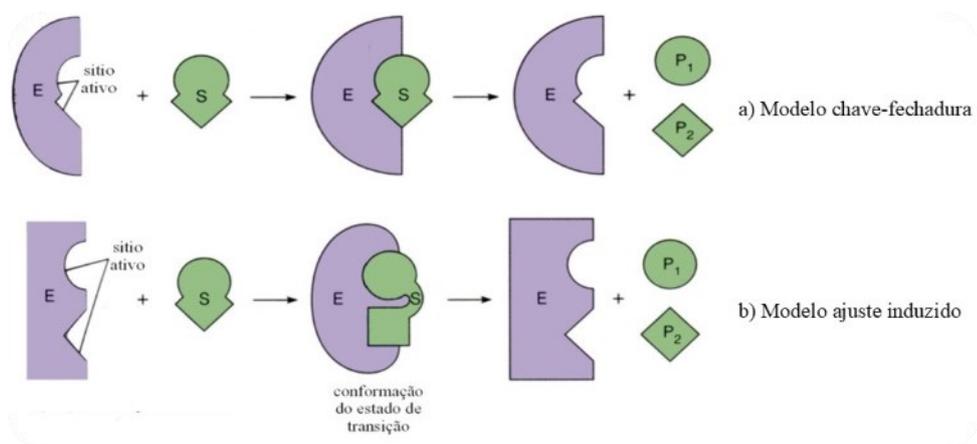
potencializa a remoção de ceras e outros componentes hidrofóbicos, o que torna o processo mais eficiente.

2.3 ENZIMAS

As enzimas são biocatalisadoras obtidas de organismos vivos que aceleram reações químicas, em condições mais amenas de temperatura e pH, além de minimizar o uso de produtos químicos agressivos, quando comparadas aos processos químicos tradicionais. São proteínas globulares compostas por cadeias de aminoácidos que se organizam tridimensionalmente para formar um sítio ativo, o local onde ocorre a reação catalítica. A especificidade das enzimas é uma de suas características mais importantes, pois permite que elas atuem apenas em determinadas substâncias, chamadas de substrato sem danificar outros componentes do material (John et al., 2020).

O modelo "chave-fechadura", proposto por Emil Fischer em 1894, foi uma das primeiras explicações para o funcionamento das enzimas, sugerindo que o substrato se encaixa perfeitamente no sítio ativo, como uma chave em uma fechadura (Figura 4a). Mais tarde, em 1958, Daniel Koshland introduziu o conceito de "ajuste induzido" (Figura 4b), no qual a enzima adapta sua forma para acomodar o substrato, melhorando a eficiência do processo catalítico. Uma ou mais cadeias polipeptídicas podem ser organizadas e dobradas para formar uma estrutura tridimensional específica, chamada de sítio ativo que incorpora o substrato. O sítio ativo pode envolver um pequeno número (menos de 10) dos aminoácidos constituintes (Mendes, Sousa e Mielke (022)).

Figura 5 – Modelo chave-fechadura



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Com base nas características mencionadas, as enzimas podem desempenhar um papel crucial nos processos industriais. O mercado global foi avaliado em US\$ 2.877 milhões, no ano de 2022 e espera-se que atinja US\$ 3.988,685 milhões até 2030. Os principais líderes de mercado de enzima industriais são Novoxymes em primeiro, seguido pela DuPont, AB Enzymes, BASF SE e DSM (Data Bridge, 2023).

2.3.1 Emprego de enzimas no beneficiamento têxtil

No beneficiamento têxtil, as enzimas são usadas principalmente em três áreas: desengomagem (remoção de agentes de goma usados para proteger as fibras durante a tecelagem), biopurga (remoção de impurezas não celulósicas, como pectinas e ceras) e alveamento (preparação do tecido para tingimento). As amilases, por exemplo, são amplamente utilizadas na desengomagem, pois hidrolisam amidos e removem com eficácia os agentes de goma das fibras (Niaz et al., 2011)

Já as pectinases e cutinases são aplicadas na biopurga do algodão, onde têm a função de remover pectinas e ceras da superfície das fibras, melhorando sua hidrofiliabilidade e tornando o tecido mais adequado para tingimento e acabamento. As enzimas têm a vantagem de agir de forma específica, removendo apenas as impurezas indesejadas, sem afetar a estrutura celulósica das fibras, como acontece nos processos químicos convencionais (Sawada et al., 2008).

O uso de enzimas no beneficiamento têxtil oferece várias vantagens em comparação aos processos tradicionais. Primeiramente, as enzimas operam em condições de pH e temperatura mais moderados, geralmente entre 40 °C e 60 °C, resultando em uma economia significativa de energia (Mojsov, 2019). Além disso, o uso de enzimas reduz a necessidade de produtos químicos agressivos, como álcalis, minimizando o impacto ambiental do processo e facilitando o tratamento dos efluentes.

Outro benefício importante é que as enzimas preservam melhor a estrutura das fibras, evitando os danos que podem ocorrer em processos de purga alcalina, onde a soda cáustica pode afetar a integridade da celulose. As fibras tratadas com enzimas mantêm suas propriedades mecânicas, como resistência e flexibilidade, e apresentam uma hidrofiliabilidade superior, essencial para processos subsequentes, como tingimento e acabamento (Sawada et al., 2008).

2.3.2 Pectinase

A pectina, um polissacarídeo presente em diversos tecidos vegetais, incluindo o algodão, é degradada pelas pectinases, enzimas que facilitam a remoção de gomas e impurezas aderidas às fibras de algodão (John et al., 2020). Essas enzimas podem ser classificadas como esterases, hidrolases e liases, dependendo do mecanismo de ação (Uenojo; Pastore, 2007), incluindo poligalacturonases, pectina esterases, pectina liases e pectato liases, com especificidades de substratos distintas (Kohli, Gupta, 2015). A aplicação de pectinases no processo de biopurga pode aprimorar a absorção de água, suavidade ao toque e brancura aceitável dos tecidos de algodão. Além disso, é possível obter substratos têxteis com ótima capacidade de tingimento, de modo eficaz quando comparado com o processo alcalino convencional, utilizando temperaturas inferiores a 60 °C (Defalco, 2022).

2.4 BIOPURGA DO ALGODÃO

A biopurga, processo inicial que utiliza enzimas específicas (Hoondal et al., 2002), tem sido objeto de pesquisas que exploram a atividade enzimática na degradação eficiente de ceras, óleos e resíduos orgânicos presentes nas fibras de algodão. Devido à sua especificidade, as enzimas atuam seletivamente nos compostos a serem removidos, permitindo um controle preciso sobre a qualidade da fibra (Hardin, 2010). A seleção das enzimas baseia-se em fatores como pH, temperatura, tempo de reação e qualidade do produto final (Hoondal et al., 2002; Shahid et al., 2016).

As fibras de algodão possuem celulose e impurezas não celulósicas localizadas na parede celular primária. Componentes como pectinas, gorduras, ceras, proteínas e corantes naturais conferem à fibra crua características hidrofóbicas e uma superfície lubrificada, dificultando a absorção de água e reduzindo a alvura da fibra. Por isso, a preparação, limpeza e transformação do algodão em material hidrofílico são etapas essenciais para garantir a absorção adequada de água e a uniformidade de cor durante o tingimento. As etapas de preparação do tecido representam uma das fases mais agressivas na indústria de beneficiamento têxtil, com alto consumo de energia, água e produtos químicos que quando combinados com elevadas temperaturas, apresentam diversas desvantagens, incluindo corrosão de equipamentos, formação de vapores tóxicos, alto consumo energético, redução da resistência das fibras e poluição ambiental, conforme descrito por Colombi (2021).

A pectina está presente, principalmente nas zonas da parede celular primária como um gel de preenchimento de espaço, tratando-se de um polímero de cadeia longa que possui dezessete diferentes monossacarídeos em sua estrutura química. A pectina, segundo Colombi (2021), é a mais complexa macromolécula natural, de alta massa molecular, comumente amorfa, insolúvel em água, solúvel em soluções alcalinas e cuja hidrólise final dá o ácido galacturônico. A alta metilação, ou seja, a transferência de átomos de carbono e hidrogênio entre substâncias, do ácido poligalacturônico torna-o altamente hidrofóbico, o que contribui para a falta de absorção de água no algodão cru.

O uso de tensoativos como surfactantes, oferecem umectabilidade, conduzem o substrato a um contato íntimo com as enzimas e as permite alcançar diferentes lugares inacessíveis da fibra (Freitas, 2009). Os surfactantes não iônicos podem ter influência na atividade enzimática, estabilizando enzimas em solução, protegendo-as da desnaturação e aumentando sua atividade, melhorando a acessibilidade ao substrato. Além disso, diminuem a tensão superficial, facilitando uma melhor interação entre a enzima e o substrato (Wang et al., 2020; (Badmus; Amusa; Oyehan; A Saleh, 2021).

Os tensoativos não iônicos são conhecidos por suas excelentes propriedades umectantes, que lhes permitem penetrar nas fibras de algodão de forma eficaz. Ajudam a emulsionar óleos e dispersar sujeira ou manchas de tecido no algodão (Hera Project, 2006).

Como alternativa aos tratamentos tradicionais, os bioprocessos - biopurga e biobranqueamento - minimizam os danos às fibras por serem realizados em condições brandas de pressão, pH e temperatura, além de serem ecologicamente aceitáveis devido à redução na quantidade de produtos químicos e energia consumidos e na geração de efluentes (Colombi, 2021).

No entanto, a viabilidade econômica, afetada pelo alto custo das enzimas, e diversos problemas tecnológicos, como taxas reacionais mais lentas e menor eficácia, impedem sua plena adoção em aplicações industriais (Shahid et al., 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAS

Os experimentos foram conduzidos no campus de Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina, no Laboratório de Meio Ambiente (LABMAM).

Neste trabalho, utilizou-se a enzima pectinase, gentilmente doada pela empresa Akmey Biotecnologia Têxtil, localizada na cidade de Indaial, em Santa Catarina. O surfactante não iônico Berol® 175, à base de um álcool primário de base natural, possui caráter hidrofílico e é solúvel em água; foi gentilmente cedido pela empresa Macler Produtos Químicos, situada na cidade de Timbó, Santa Catarina.

A malha utilizada era de estrutura Jersey, composta por 100% de algodão cru, com gramatura de 160 g/m².

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

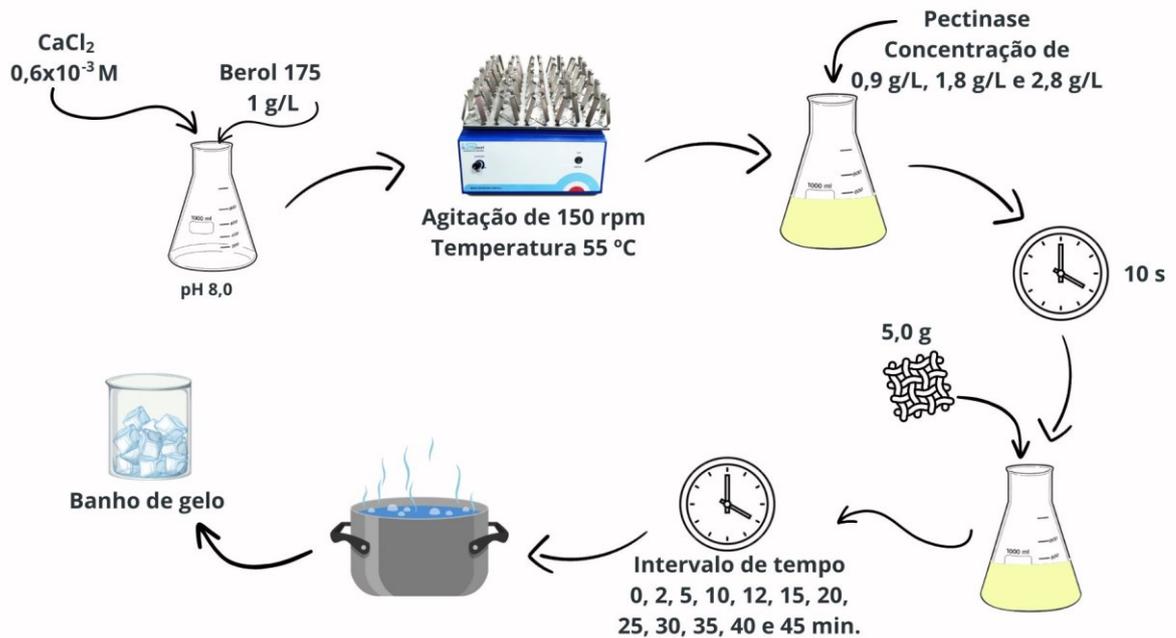
3.2.1 Biopurga

A biopurga foi realizada em Erlenmeyers de 250 mL, com adição inicial de 1 g/L de surfactante não iônico (Berol 175) e $0,6 \times 10^{-3}$ M de cloreto de cálcio, utilizando uma relação de banho de 1:30 (massa de tecido em g: volume de solução em mL). As soluções foram submetidas a agitação em um agitador orbital (Shaker) da marca New Lab, modelo NL-343-01, a 150 rpm por 5 minutos, para garantir a homogeneização da temperatura. Em seguida, diferentes concentrações enzimáticas (0,9; 1,8 e 2,8 g/L) foram adicionadas e incubadas por mais 5 minutos, visando alcançar o equilíbrio térmico.

O cronômetro foi iniciado, e malhas de algodão (5,0 g) foram inseridas nos frascos Erlenmeyer a intervalos de 10 segundos. Amostras foram retiradas em diferentes tempos de reação, totalizando 0, 2, 5, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 45 minutos. Após a remoção das amostras de tecido da solução enzimática, elas foram submetidas à fervura por 5 minutos, para garantir a completa inativação da enzima. Em seguida, os tecidos foram lavados com água destilada em temperatura ambiente e secos em estufa à 60 °C por 5 minutos.

O esquema do ensaio de biopurga está representado na Figura 6.

Figura 6 – Esquema do ensaio de biopurga



Fonte: a autora, 2024.

Os tratamentos enzimáticos foram conduzidos a pH 8,0 (tampão acetato 0,1 M) e temperatura constante de $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Paralelamente, foram realizados tratamentos controle nas mesmas condições experimentais, sem a adição de enzima, mas com igual relação de banho e concentrações de surfactante não iônico e cloreto de cálcio.

Os experimentos foram conduzidos em triplicata, totalizando quatro grupos experimentais: Biopurga 0 (sem enzima), Biopurga 1 ($0,9 \text{ g/L}$), Biopurga 2 ($1,8 \text{ g/L}$) e Biopurga 3 ($2,8 \text{ g/L}$). Para cada intervalo de amostragem, um frasco Erlenmeyer foi utilizado, conforme ilustrado na Figura 5. O tempo total de reação foi de 45 minutos.

3.2.2 Determinação de açúcares redutores totais

Foi utilizado o método de determinação de açúcares redutores totais para definir a atividade enzimática da enzima pectinase e para precisar a quantidade de açúcares formados na etapa de biopurga. A concentração de açúcares redutores totais (ART) foi determinada pelo método do ácido 3,5-dinitrossalicílico (DNS), conforme proposto por Miller (1959). O princípio parte dos monossacarídeos que são determinados com base na oxidação dos grupos aldeídos à grupos carboxílicos em presença de ácido 3,5-dinitrossalicílico. O DNS (agente oxidante) é por sua vez reduzido a ácido-3-amino-5-nitrossalicílico, que apresenta coloração

amarela. A intensidade da coloração é medida em espectrofotômetro a 540 nm, o qual é proporcional à concentração de açúcares redutores na amostra. (NEGRULESCU et al., 2012).

O reagente DNS é preparado pela dissolução de 16 g de NaOH em 100 mL de água deionizada, utilizando banho de gelo e agitação constante até a sua completa dissolução, sendo acrescentado aos poucos mais 100 mL de água deionizada. Em seguida, um béquer é revestido com papel alumínio, e 10 g de DNS são pesados e incorporados lentamente à solução de NaOH. Com o auxílio de um bastão de vidro o DNS é macerado com o intuito de facilitar o processo de dissolução do reagente. Então, após a completa dissolução dele, 300 g de tartarato de potássio e sódio (Sal de Rochelle) são acrescentados gradualmente. Por fim, a solução é avolumada para 1 litro com água deionizada em um balão volumétrico e armazenada em frasco âmbar ao abrigo da luz.

O procedimento para a quantificação de açúcares redutores foi realizado conforme descrito por Defalco (2022): em um tubo de ensaio, adicionaram-se 1 mL da amostra previamente diluída e 0,5 mL de reagente DNS. A mistura foi mantida em banho-maria fervente por 5 minutos e, posteriormente, resfriada em um banho de gelo. Em seguida, adicionaram-se 1,5 mL de água deionizada para completar o volume final de 10 mL. A leitura foi realizada em espectrofotômetro a um comprimento de onda de 540 nm. A quantificação dos açúcares redutores foi efetuada com o auxílio de uma curva de calibração, utilizando glicose como padrão em água deionizada. A curva de calibração foi estabelecida com concentrações diferentes a partir da solução-mãe de glicose de 0,6 g/L (APÊNDICE A).

3.2.3 Determinação da atividade da pectinase

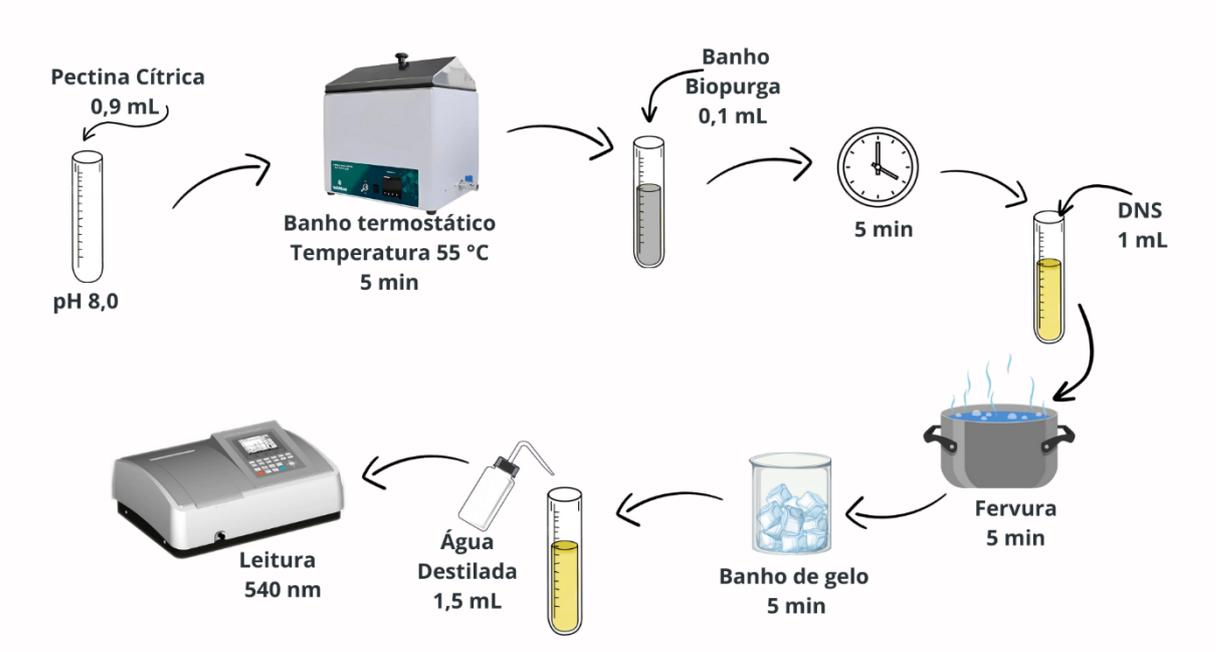
A atividade enzimática da pectinase foi determinada medindo-se a liberação de açúcares redutores provenientes do ácido poligalacturônico, empregando a pectina cítrica como substrato. A quantificação dos açúcares redutores no meio foi determinada com base na metodologia proposta por Miller (1959), conforme descrito no item 3.2.2.

Uma solução de 0,9 mL, contendo pectina cítrica a 0,25% (p/v), 20mM de NaCl e 0,1 mM de CaCl₂ em tampão acetato 0,1 M (pH 8,0) foi incubada por 5 minutos em um tubo de ensaio a 55 °C com uma alíquota do banho de biopurga de 0,1 mL. Após este tempo adicionou-se 1 mL de DNS para interromper a reação e a solução foi levada à fervura por 5 min. Em seguida, a solução foi resfriada em banho de gelo e diluída com 1,5 mL de água destilada. A leitura no espectrofotômetro M. Cronal UV-VIS modelo AJK-1600, onde a absorbância foi lida

em 540 nm. Foram feitas O branco das amostras foram preparados substituindo-se a enzima por volumes correspondentes de água.

O procedimento experimental está ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema das etapas para a determinação da atividade enzimática



Fonte: a autora, 2024.

Uma unidade de atividade de pectinase (U) é definida como a quantidade de enzima necessária para catalisar a formação de 1 μmol de açúcar redutor por minuto à 55 °C, conforme Equação 1.

$$\frac{U}{ml} = \frac{\Delta_{\text{absorbância}}}{\Delta t} \times \frac{V_{\text{total}}}{V_{\text{enzima}}} \times d_{\text{enzima}} \quad (1)$$

Onde: $\Delta_{\text{absorbância}}/\Delta t$ é a razão de aumento da absorbância por minuto; V_{total} é o volume total da mistura reacional; V_{enzima} é o volume utilizado de enzima; d_{enzima} é a diluição da preparação enzimática antes da adição na reação. A unidade U é expressa em mg/mL.min.

3.3 ANÁLISES DAS AMOSTRAS DE TECIDO TRATADAS

Neste tópico serão apresentadas as metodologias adotadas para avaliar o efeito dos tratamentos enzimáticos sobre o tecido de algodão, sendo elas: determinação da pectina residual, capilaridade e hidrofiliidade.

3.3.1 Determinação da pectina residual

A determinação da pectina residual das amostras foi efetuada por meio da aplicação do método do corante azul de metileno. Esse método fundamenta-se na reação estequiométrica entre o cátion presente no corante e o ânion pertencente à pectina. Além disso, leva em conta que a purga alcalina, considerada padrão, remove até 100% da pectina presente nas fibras do tecido. O tratamento enzimático, por sua vez, visa alcançar níveis de remoção de pectina similares aos da purga convencional, proporcionando uma alternativa menos agressiva e mais sustentável. Quanto maior for a quantidade de pectina residual na amostra, maior será a quantidade de azul de metileno absorvida nas fibras, resultando em um tecido de malha azul de maior intensidade após o tingimento.

Nesse contexto, as amostras tratadas foram sujeitas a um processo de tingimento utilizando uma solução de azul de metileno com concentração de 0,6 mmol/L, mantendo uma proporção de 1:20 (massa do tecido para volume de solução) por 100 min, em um banho com agitação a 70 °C. Os tingimentos foram realizados em máquina de tingimento IR DYER da marca Tex Control disponível no Laboratório de Beneficiamento (LABENE).

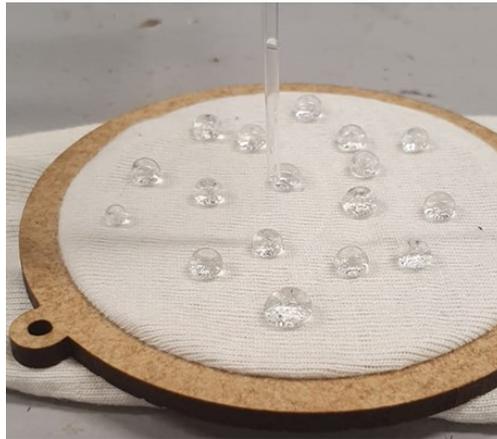
A quantificação da pectina residual foi realizada por meio da avaliação da absorvância da solução do corante antes e após o processo de tingimento, utilizando um espectrofotômetro UV-VIS, Bel Photonics, modelo UV-M51, a um comprimento de onda de 663 nm. Com o intuito de estabelecer uma base de referência, foi elaborada uma curva de calibração com concentrações de corante variando de 2 a 19 mg/L, respeitando o limite de linearidade da absorvância conforme a lei de Lambert-Beer (APÊNDICE A). As amostras foram preparadas e analisadas em triplicata.

3.3.2 Hidrofiliidade

A determinação da hidrofiliidade foi realizada por meio do método de visualização rápida, adaptado da norma NBR 13.000, sendo a adaptação caracterizada pelo aumento do

número de gotas utilizadas no teste. No qual, constituiu na fixação do tecido em um bastidor de bordado e o gotejamento de gotas de água destilada (25 ± 2 °C), a 40 mm da superfície do tecido. O cronômetro foi acionado quando a gota entrou em contato com a superfície do tecido e parado quando ela foi absorvida sobre a superfície do tecido. Na Figura 8, podemos observar uma das amostras de tecido presa a um bastidor para a determinação da hidrofiliidade

Figura 8 – Representação do teste de hidrofiliidade



Fonte: a autora (2024).

3.3.3 Capilaridade

A capilaridade representa uma métrica utilizada para avaliar a capacidade de absorção vertical de água em tecidos e foi quantificada de acordo com as configurações do teste padrão JIS L 1907 (JIS, 2004), com algumas adaptações. Neste procedimento de absorção, a extremidade inferior (≤ 2 cm) de uma faixa de amostra (2,5 cm x 20 cm) foi posicionada verticalmente em um recipiente contendo água e 5% de corante direto Turquesa Tricel NG-LBF. O tempo permitido para a ascensão do fluido foi fixado em 2 minutos, e a altura alcançada, expressa em milímetros, foi registrada como resultado. Quanto maior a altura da coluna umedecida, melhor a absorção vertical da amostra.

A Figura 9 apresenta o dispositivo utilizado no experimento, bem como as amostras testadas.

Figura 9 – Amostras submetidas ao teste de capilaridade



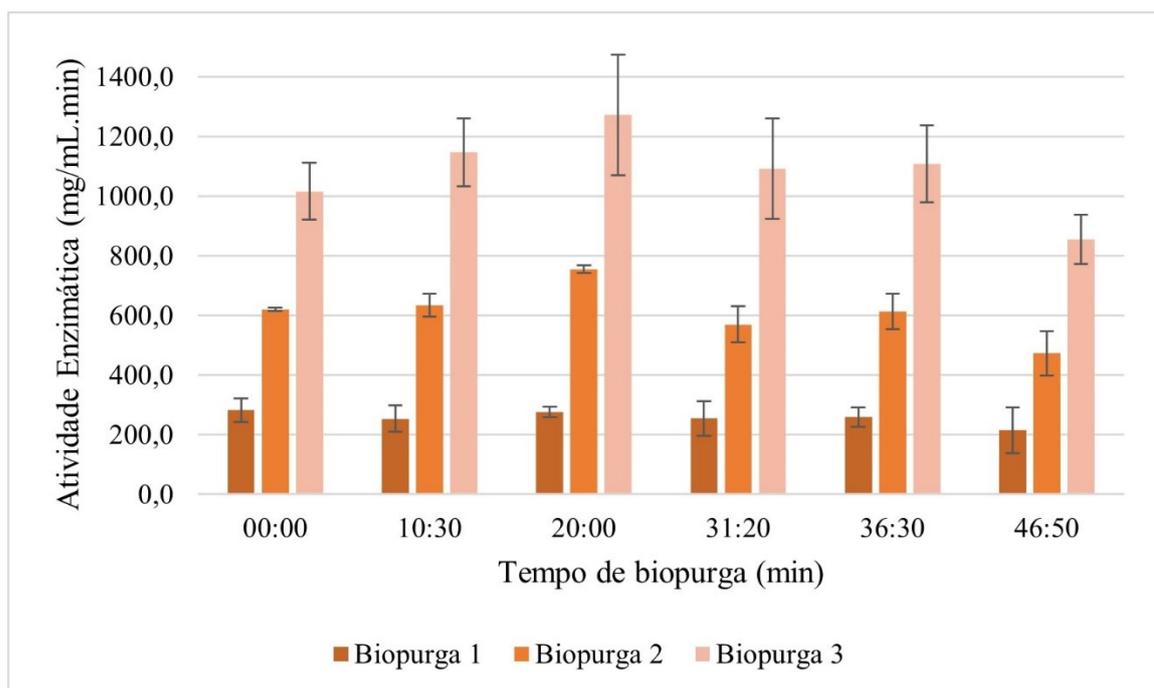
Fonte: a autora (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ATIVIDADE ENZIMÁTICA DA PECTINASE

Os resultados da atividade enzimática da pectinase, em três diferentes concentrações de enzima e nas condições de trabalho de 55 °C em pH 8,0; podem ser observados na Figura 10.

Figura 10 – Gráfico da atividade enzimática para as três concentrações de pectinase estudada



Fonte: a autora, 2024.

Ao observar a Figura 10, pode-se notar que a atividade enzimática inicial é proporcional à concentração de pectinase em cada biopurga, ou seja, quanto maior a quantidade de enzima empregada, maior a atividade enzimática observada. Assim, na Biopurga 3, onde empregou-se uma concentração de 2,8 g/L de enzima, obteve-se os valores mais elevados de atividade enzimática, seguida pela Biopurga 2 com 1,8 g/L de enzima e, por fim, a Biopurga 1 com 0,9 g/L de enzima. Quanto maior a quantidade de enzima, maior a quantidade de açúcar redutor liberado.

Além disso, observa-se que uma máxima atividade enzimática ($282,21 \pm 39,42$ mg/mL.min, $754,5 \pm 13,1$ mg/mL.min e $1272,5 \pm 201,8$ mg/mL.min nas biopurgas 1, 2 e 3, respectivamente) foi alcançada entre 0 e 20 minutos, seguida por um declínio. Esse comportamento sugere que a enzima inicialmente é bastante ativa, catalisando rapidamente a remoção de pectina e outros componentes hidrofóbicos. No entanto, com o passar do tempo, a atividade começa a diminuir, possivelmente devido à remoção de compostos diferentes de pectina que podem causar a inibição, por exemplo os óleos e graxas que são liberados juntamente com a remoção da pectina presentes na cutícula (Colombi, 2021) e pela temperatura.

A Biopurga 3, inicia aumentando de forma gradual obtendo um ápice em 20 min, e também apresenta um declínio mais acentuado após esse tempo, indicando que concentrações mais elevadas favorecem um pico de atividade mais intenso, o que pode estar relacionado à maior remoção da cutícula e conseqüentemente de outros compostos que podem contribuir com o efeito inibitório.

Com base na atividade enzimática, espera-se que os melhores resultados sejam alcançados na Biopurga 3, promovendo uma remoção de pectina mais eficiente.

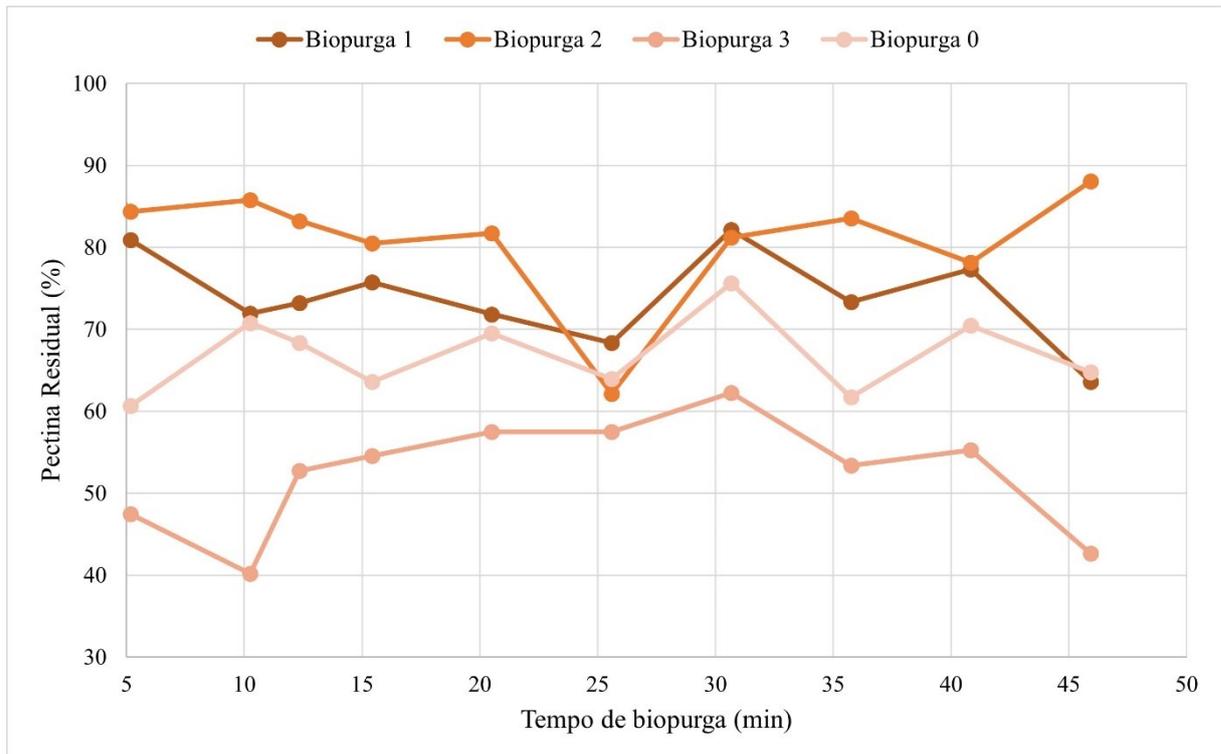
4.2 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

4.2.1 Grau residual de pectina

A pectina é o principal componente existente na cutícula do algodão, sendo que a degradação e solubilização das pectinas desestabilizam a parede primária e facilitam a remoção de triglicerídeos e ceras hidrofóbicas, levando ao aumento da absorção de água (Colombi et al., 2021). Dessa forma, entende-se que a avaliação da pectina residual vem a ser o parâmetro mais importante a ser medido.

Conforme ilustrado na Figura 11, observa-se que a partir dos primeiros 5 minutos a enzima já removeu pectina do tecido.

Figura 11 – Porcentagem de pectina residual



Fonte: a autora, 2024.

Os resultados evidenciaram que a Biopurga 3 apresentou o melhor resultado de remoção de pectina, tendo em vista que obteve teores entre 62,25% (máximo) e 40,21% (mínimo) de pectina residual. Além disso a Biopurga 3 demonstrou um comportamento mais coerente em relação as outras biopurgas, por apresentar uma linearidade ao longo do tempo.

Quanto a Biopurga 2 embora tenha maior concentração de enzima que a Biopurga 1, demonstrou predominantemente em quase todos os pontos resultado inferior a eficiência da remoção da pectina, com exceção aos tempos de biopurga de 25,5 e 30,6 minutos. Isso demonstra que teores de concentração de enzima abaixo de 1,8 g/L (Biopurga 1 e 2) demonstraram remoções de pectinase abaixo biopurga sem enzima (Biopurga 0), isto é, se demonstrou pouco efetiva quando comparado a teores de 2,8 g/L (Biopurga 3).

As Biopurgas 0 e 1, apresentaram uma flutuação no índice de remoção, indicando que a remoção de pectina foi mínima ou ineficaz, o que é consistente com a baixa concentração de enzima ou ausência de pectinase suficiente para promover a remoção. A Biopurga 2 obteve

êxito na remoção da pectina até os 25 minutos. Em seguida, passou a flutuar conforme observado nas Biopurgas 0 e 1, perdendo a eficiência da ação da enzima. Isso pode ter sido ocasionado por uma possível redistribuição no tecido, o que provocou o aumento de pectina residual.

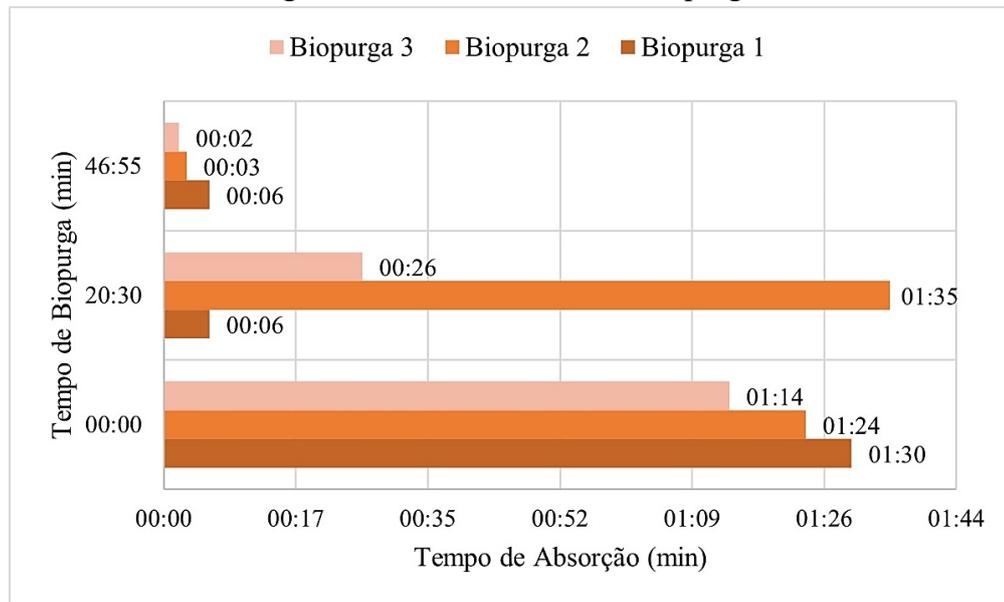
A metodologia de agitação e remoção de pectina, embora limitada em relação à representação precisa de um processo industrial, demonstrou que, em concentrações mais altas de pectinase, a remoção de pectina foi eficiente. Esses resultados, embora imprecisos para simular o comportamento industrial exato, não representam um impedimento significativo, já que a remoção de pectina pode continuar ocorrendo durante o tingimento.

No entanto, é importante destacar que o processo foi realizado em um shaker, cuja agitação não possui a mesma intensidade que um sistema com agitação de caneco. Essa limitação pode dificultar a remoção da pectina. Além disso, a falta de homogeneidade na distribuição da temperatura também pode ser um fator limitante para a eficiência desse processo. Estudos anteriores realizados com sistemas de agitação de caneco, como os de Colombi (2021), Defalco (2022) e Hobolt (2023), demonstram uma remoção mais eficiente de pectina, provavelmente devido ao melhor controle da temperatura e da agitação. Portanto, estes resultados podem estar associados a imprecisão do método ou erro experimental.

4.2.2 Hidrofilidade

Conforme a Figura 12, pode-se observar que, à medida que o tempo de biopurga aumenta, o tempo de absorção diminui para todas as concentrações de pectinase testadas sendo elas: Biopurga 1 (0,9 g/L), Biopurga 2 (1,8 g/L) e Biopurga 3 (2,8 g/L).

Figura 12 – Hidrofilidade das biopurgas



Fonte: a autora (2024).

No final do período de 45 minutos de biopurga, todas as amostras mostraram uma absorção praticamente instantânea da água, sugerindo que o tratamento foi eficaz para aumentar a hidrofilidade.

A Figura 12, demonstra que o aumento do tempo de biopurga está diretamente associado a uma melhora na absorção de água pelo tecido. Observa-se, contudo, que para tempos de biopurga superiores a 45 minutos, as diferenças na capacidade de absorção tornam-se pouco expressivas. Em particular, o tempo de biopurga de 46 minutos mostrou-se suficiente para alcançar índices satisfatórios de absorção em todas as concentrações enzimáticas avaliadas.

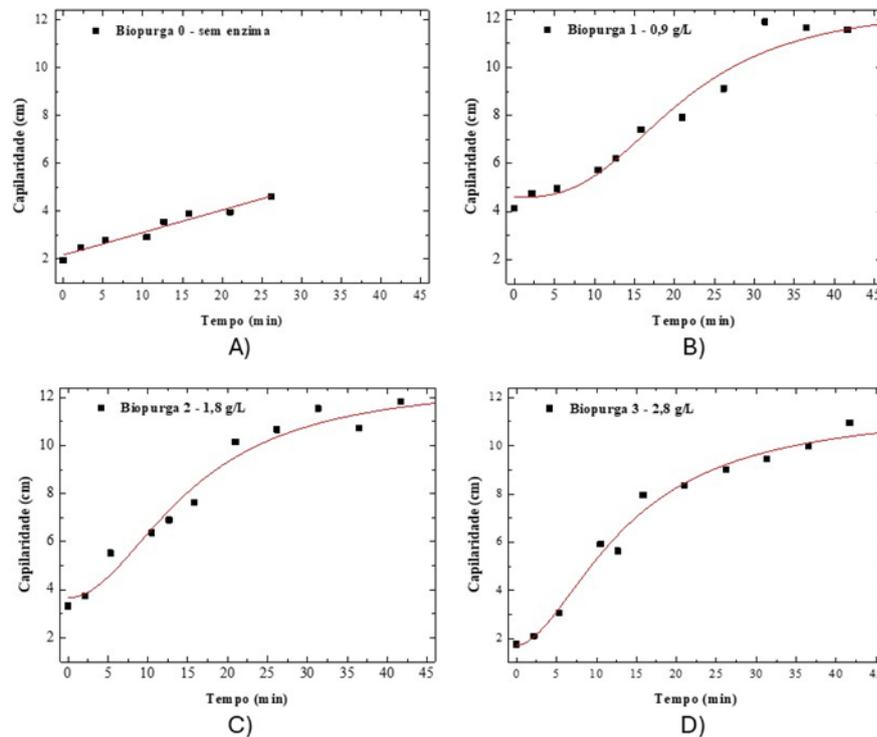
A Biopurga 1, apesar de possuir a menor concentração de enzima, destacou-se pela eficiência na absorção de água em tempos mais curtos, quando comparada às demais condições testadas. Por outro lado, a Biopurga 2 apresentou pouca variação na absorção entre os tempos iniciais de 0 e 20 minutos, indicando que a atividade enzimática atingiu seu máximo potencial após esse período. Já a Biopurga 3, com a maior concentração de enzima, exibiu um comportamento mais linear em relação à absorção de água, diferenciando-se tanto do aumento abrupto observado na Biopurga 1 quanto do início mais tardio da atividade na Biopurga 2.

Com base nesses resultados, conclui-se que a Biopurga 1 apresentou maior eficácia em função do tempo reduzido de processo, embora todas as condições tenham alcançado resultados satisfatórios ao atingir o tempo de 46 minutos de biopurga.

4.2.3 Capilaridade

Analisando a Figura 13, a capilaridade aumenta de forma gradual nos primeiros minutos, indicando que a solução de biopurga está sendo absorvida pela malha de algodão. Após 30 min (tempo da biopurga), a capilaridade se aproxima de um platô sugerindo que o material atingiu sua capacidade máxima de absorção.

Figura 13 – Capilaridade das biopurgas



Fonte: a autora, 2024.

Os resultados das três biopurgas demonstram um aumento no ganho de capilaridade à medida que a concentração de pectinase aumenta. Ou seja, quanto maior a quantidade de enzimas presentes na biopurga, melhor é o processo de hidrofiliabilidade do tecido. Essa relação é evidenciada pela diferença observada entre os tempos inicial e final e o aumento da capacidade de absorção do tecido. A Biopurga 1 apresentou um ganho de capilaridade de $7,75 \pm 1,01$ cm. Já a Biopurga 2 registrou um aumento para $8,49 \pm 0,66$ cm. Por fim, a Biopurga 3 obteve o melhor desempenho, com um ganho de capilaridade de $9,19 \pm 1,00$ cm.

Estes resultados indicam que um aumento da concentração de pectinase proporciona uma remoção mais eficiente das barreiras hidrofóbicas, como as pectinas, melhorando progressivamente a capacidade de absorção de água do tecido. Conseqüentemente, quanto

maior a concentração de pectinase, maior a capilaridade e a hidrofili­dade do tecido, demonstrando uma relação direta entre a quantidade de enzima e o ganho de hidrofili­dade.

Mesmo com as limitações observadas na metodologia aplicada, é possível afirmar que a pectinase foi eficaz na remoção de pectina das malhas de algodão. A melhora na hidrofili­dade das fibras confirma a eficiência do processo, tanto pela ação direta da pectinase quanto pelo auxílio do surfactante, que atuou como um agente umectante e emulsificante. O surfactante não apenas removeu óleos e ceras das fibras, mas também aumentou a hidrofili­dade, complementando a atuação da pectinase.

Conforme Colom­bi (2022), no processo de biopurga, o surfactante facilita a remoção da camada oleosa das fibras de algodão por emulsificação, solubilização ou pela combinação de ambos, enquanto as pectinases hidrolisam as substâncias péc­icas. O mecanismo inicia-se com a degradação das pectinas, o que libera as ceras, tornando-as mais facilmente removíveis com o auxílio de surfactantes e agitação mecânica. Esse sistema permite que o algodão alcance maior hidrofili­dade sem comprometer a integridade da fibra.

Portanto, o sistema de biopurga não apenas removeu impurezas, mas também melhorou a capacidade das fibras de absorver água, um fator essencial para o desempenho do tecido em processos posteriores, como tingimento e acabamento.

5 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam que, apesar da redução na atividade enzimática ao longo do processo de biopurga, a pectinase foi eficaz na remoção de pectina e na melhoria da hidrofiliabilidade do tecido. A maior eficiência foi observada nas amostras tratadas com concentrações mais altas de enzima, especialmente na Biopurga 3 (2,8 g/L), que apresentou os melhores resultados em termos de remoção de pectina, aumento de capilaridade e absorção de água. Ainda assim, mesmo com a diminuição da atividade enzimática após 25 minutos, o processo se mostrou sustentável e viável dentro do intervalo de 45 minutos.

O teste de hidrofiliabilidade revelou que a remoção de pectina facilitou a penetração da água nas fibras, enquanto o teste de capilaridade demonstrou uma relação direta entre a concentração de enzima e o ganho de hidrofiliabilidade. No entanto, limitações no sistema de agitação e no controle de temperatura indicam que melhorias no método poderiam aumentar ainda mais a eficiência do processo. Em sistemas industriais, uma agitação uniforme e o controle rigoroso das variáveis operacionais são indispensáveis para a aplicação do processo.

Além disso, o uso combinado de pectinase e surfactante mostrou ser uma abordagem eficaz para atingir os objetivos do estudo. O surfactante contribuiu para a emulsificação de ceras e óleos, complementando a ação da enzima e aumentando a hidrofiliabilidade do tecido.

Conclui-se, portanto, que o uso de pectinase no processo de biopurga representa uma alternativa sustentável e eficiente aos métodos químicos tradicionais, proporcionando benefícios como menor impacto ambiental e preservação da qualidade das fibras. Este estudo destaca a importância do controle das condições operacionais para viabilizar a aplicação industrial do processo, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência da cadeia produtiva têxtil.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos com concentrações de enzima ainda maiores, visando uma remoção mais eficaz de pectina do substrato. Além disso, a otimização do tempo de processo pode permitir a avaliação da substituição do banho saturado por um novo banho enzimático. Outra sugestão é investigar o reuso da enzima, com o objetivo de reduzir os custos do processo. Os estudos também devem ser realizados em sistema de tingimento em canecos para um melhor controle da temperatura e agitação.

Aumentar a repetição, visto que ambos os métodos de análise, capilaridade e remoção de pectina por reação de azul de metileno, apresentam variação grande, necessitando de maiores replicações para uma melhor análise dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 13000**: Material têxtil – Determinação da hidrofiliidade de tecidos. Rio de Janeiro, 1993.
- AGRAWAL, P. B.; NIERSTRASZ, V. A.; KLUG-SANTNER, B. G.; GÜBITZ, G. M. LENTING, H. B. M.; WARMOESKERKEN, M. M. C. G. **Wax removal for accelerated cotton scouring with alkaline pectinase**. *Biotechnology Journal*, v. 2, p. 306–315, 2007
- AKIN, Danny E. **Chemistry of plant fibres. Industrial applications of natural fibres: structure, properties and technical applications**, p. 13-22, 2010.
- AMPA – **IMAmt**. 2018. Disponível em <<https://imamt.org.br/>> Acesso em: 12 de nov. de 2023.
- BERGAMASCO, Daives Arakem. **Tratamento corona: Nova aplicação para a indústria têxtil no beneficiamento de palha de seda**. *Química Têxtil*, Barueri, n. 135, p.6-57, jul. 2019.
- BIKASH, J., DAS, B. P., KHANDUAL, A., SAHU, S., & BEHERA, L. (2015). **Ecofriendly processing of textiles**. *Materials today: proceedings*, 2(4-5), 1776-1791.
- BADMUS, Suaibu O.; AMUSA, Hussein K.; OYEHAN, Tajudeen A.; A SALEH, Tawfik. **Environmental risks and toxicity of surfactants: overview of analysis, assessment, and remediation techniques**. *Environmental Science and Pollution Research*, [S.L.], v. 28, n. 44, p. 62085-62104, 29 set. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-16483-w>.
- CHAIM, Marcos Souza. **Guia técnico ambiental da indústria têxtil**. 1. ed. Editora: FIEMG - Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais, FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014.
- COLOMBI, Bruna Lyra. **Biopreparação enzimática de malha de algodão: avaliação de parâmetros processuais e reúso da solução enzimática**. 2021. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.
- DE AGUIAR, C. R. L. **Engenharia Têxtil: Uma Abordagem Simplificada**. Florianópolis: [s.n.].
- DESORE, A., NARULA, S.A. **An overview on corporate response towards sustainability issues in textile industry**. *Environ Dev Sustain* 20, 1439–1459 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10668-017-9949-1>
- DEFALCO, Silvia de Lima. **Substituição dos processos tradicionais de purga, alveamento e tingimento por processos enzimático na indústria têxtil**. 2023. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Têxtil, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2023.
- EINSCHLAG, F. S. G.. **Waste Water: Treatment and Reutilization**. S. L.: Intech, 2011. Cap. 20, p. 387-404.

HARDIN, I. R. **Enzymatic treatment versus conventional chemical processing of cotton**. In: *Advances in Textile Biotechnology*. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2010. p. 132–149

HILL, R. Fashion Unknown Fact | 10,000 liters of water. . .grow one kilo of cotton. EDGE Fashion Intelligence, 2019. Disponível em <<https://edgexpo.com/2019/03/29/edge-fast-fact-10000-liters-of-water-grow-one-kilo-of-cotton/>> Acesso em: 29 de nov. de 2023.

HERA PROJECT. **HERA Risk Assessment of Alcohol Ethoxylates (AE)**. Versão 2. 2009. Disponível em: <https://www.heraproject.com/files/34-f-09%20hera%20ae%20report%20version%202%20-%203%20sept%2009.pdf>. Acesso em: 16 out. 2024.

HOONDAL, G.; TIWARI, R.; TEWARI, R.; DAHIYA, N.; BEG, Q. **Microbial alkaline pectinases and their industrial applications: A review**. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 59, n. 4, p. 409–418, 2002.

HUSSAIN, T.; WAHAB, A. **A critical review of the current water conservation practices in textile wet processing**. *Journal of Cleaner Production*, v. 198, p. 806–819, 2018.

JIS (Japanese Industrial Standard). **JIS L 1907: Testing methods for water absorbency of textiles**. Japan, 2004.

JOHN, J.; KAIMAL, K. K. S.; SMITH, M. L.; RAHMAN, P. K. S. M.; CHELLAM, P. V. **Advances in upstream and downstream strategies of pectinase bioprocessing: A review**. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 162, p. 1086–1099, 2020.

KARMAKAR, S. R. **Chemical technology in the pre-treatment processes of textiles**. First edit ed. [s.l: s.n.]. 1999.

KITTUR, F. S., KUMAR, A. B. V., GOWDA, L. R., & THARANATHAN, R. N. (2003). **Chitosanolytic activity of a pectinase isozyme of *Aspergillus niger*: A non-specific activity**. *Carbohydrate Polymers*, 53, 191–196.

KLYOSOV, Anatole A. **Trends in biochemistry and enzymology of cellulose degradation**. *Biochemistry*, v. 29, n. 47, p. 10577-10585, 1990.

KOHLI, P.; GUPTA, R. **Alkaline pectinases: A review**. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 4, n. 3, p. 279–285, 2015.

MACEDO, M. A.. **A gestão do Design como fator de inovação em redes de empresas: o caso do Santa Catarina moda e cultura (scmc)**. 2015. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MADHU, Amit; CHAKRABORTY, Jadu N. **Developments in application of enzymes for textile processing**. *Journal of cleaner production*, v. 145, p. 114-133, 2017.

MARKET RESEARCH REPORT. **Textile Global Market Report 2022-2030: Rise in eCommerce, Environmental Concerns & Large Skilled and Unskilled Workforce Driving**

Growth. Dublin: Business Wire, 2022. Disponível em: <https://www.businesswire.com/news/home/20220708005225/en/Textile-Global-Market-Report-2022-2030-Rise-in-eCommerce-Environmental-Concerns-Large-Skilled-and-Unskilled-Workforce-Driving-Growth---ResearchAndMarkets.com>. Acesso em: 13 nov. 2023.

MENDES, K. F.; SOUSA, R. N. de; MIELKE, K. C. (ed.). **Biodegradation Technology of Organic and Inorganic Pollutants.** [S. L.]: Intechopen, 2022. 494 p.

MK, Nisha. **Process optimization for bioscouring of cotton fabrics with pectinase obtained from Paecilomyces variotii.** ResearchGate, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Nisha-M-K/publication/303916375_Process_Optimization_for_Bioscouring_of_Cotton_Fabrics_with_Pectinase_obtained_from_Paecilomyces_variotii/links/610b3341169a1a0103ddcf22/Process-Optimization-for-Bioscouring-of-Cotton-Fabrics-with-Pectinase-obtained-from-Paecilomyces-variottii.pdf. Acesso em: 07 out. 2024.

MOJSOV, K. **Enzyme scouring of cotton fabrics:** a review. *International Journal of Marketing and Technology*, v. 2, n. 9, p. 256–275, 2012.

NERURKAR, M.; JOSHI, M.; ADIVAREKAR, R. **Bioscouring of Cotton using Lipase from Marine Bacteria Bacillus sonorensis.** *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 175, n. 1, p. 253–265, 2015.

NEGRULESCU, Anamaria & PATRULEA, Viorica & STEF - MINCEA, Manuela & IONASCU, Cosmin & VLAD-OROS, Beatrice & OSTAFE, Vasile. (2012). **Adapting the Reducing Sugars Method with Dinitrosalicylic Acid to Microtiter Plates and Microwave Heating.** *Journal of the Brazilian Chemical Society*.

PEREIRA, Francisco Sávio Gomes. **BIOQUÍMICA NUMA ABORDAGEM QUÍMICA.** Unpublished, Recife (MG). 2010. Unpublished. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.17251.14889>.

REZAEI, M.; MORADI, M.; ALIZADEH, Z. **Enzymatic treatment of cotton fibers to improve dyeing properties.** *Protein Peptide Letters*, v. 28, n. 5, p. 33871, 2023. Disponível em: <https://journals.sbmu.ac.ir/protein/article/view/33871/27572>. Acesso em: 05 out. 2024.

SARKAR, Ajoy K.; JOHNSON, Ingrid; COHEN, Allen C. **JJ Pizzuto's Fabric Science: -with STUDIO.** Bloomsbury Publishing USA, 2023.

SACCOL, Amarolinda Zanela; REINHARD, Nicolau. **Tecnologias de informação móveis, sem fio e ubíquas: definições, estado-da-arte e oportunidades de pesquisa.** *RAC: Revista de Administração Contemporânea*, v.11, n.4, 2007.

SANTANA, João Cecílio Farias de et al. **Tecnologia da fibra e do fio do algodão.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2001. 23 p

SANYO CHEMICAL SOLUTIONS. **Non-ionic surfactants and their applications in the textile industry.** 2024. Disponível em: <https://sanyo-chemical-solutions.com/technology/2024/04/102498/#non-ionic>. Acesso em: 16 out. 2024.

SHAHID, M.; MOHAMMAD, F.; CHEN, G.; TANG, R. C.; XING, T. **Enzymatic processing of natural fibres**: White biotechnology for sustainable development. *Green Chemistry*, v. 18, p. 2256–2281, 2016.

SILVA, L. M.; SILVA, R. F.; LOPES, D. M.; SANTOS, C. E. **Estudo de purga biológica em algodão com enzima pectinase**: Uma abordagem experimental. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 4, p. 31730, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/31730/27768>. Acesso em: 05 out. 2024.

SOUZA, A. C. A. de. **Panorama geral do mercado de algodão brasileiro antes e durante a pandemia: uma análise comparativa com as culturas de milho e soja**. 2022. Tese de Doutorado.

SOUZA, G. L. V.; OLIVEIRA NETO, G. C. de. **Evaluation of the Circularity of the Adoption of Cleaner Production in the Paper Industry**. *Advances In Cleaner Production: Proceedings of the 11th International Workshop*. Florence, Italy, p. 35-36. 15 jul. 2022. Disponível em: http://www.advancesincleanerproduction.net/11th/files/proceedings_11th.pdf. Acesso em: 05 nov. 2023

STATISTA RESEARCH DEPARTMENT. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263154/worldwide-production-volume-of-textile-fibers-since-1975/> Acesso em: 12 de nov. de 2023.

UENOJO, M.; PASTORE, G. M. **Pectinases**: Aplicações industriais e perspectivas. *Química Nova*, v. 30, n. 2, p. 388–394, 2007.

VIGO, T.L. **Textile Processing and Properties**: preparation, dyeing, finishing and performance. New Orleans: Elsevier, 1994.

WANG, W.; WANG, C.; ZAHOOR; CHEN, X.; YU, Q.; WANG, Z.; ZHUANG, X.; YUAN, Z.. **Effect of a Nonionic Surfactant on Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulose Based on Lignocellulosic Features and Enzyme Adsorption**. *Acs Omega*, [S.L.], v. 5, n. 26, p. 15812-15820, 25 jun. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.0c00526>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c00526>. Acesso em: 13 out. 2024.

TRABALHOS PUBLICADOS

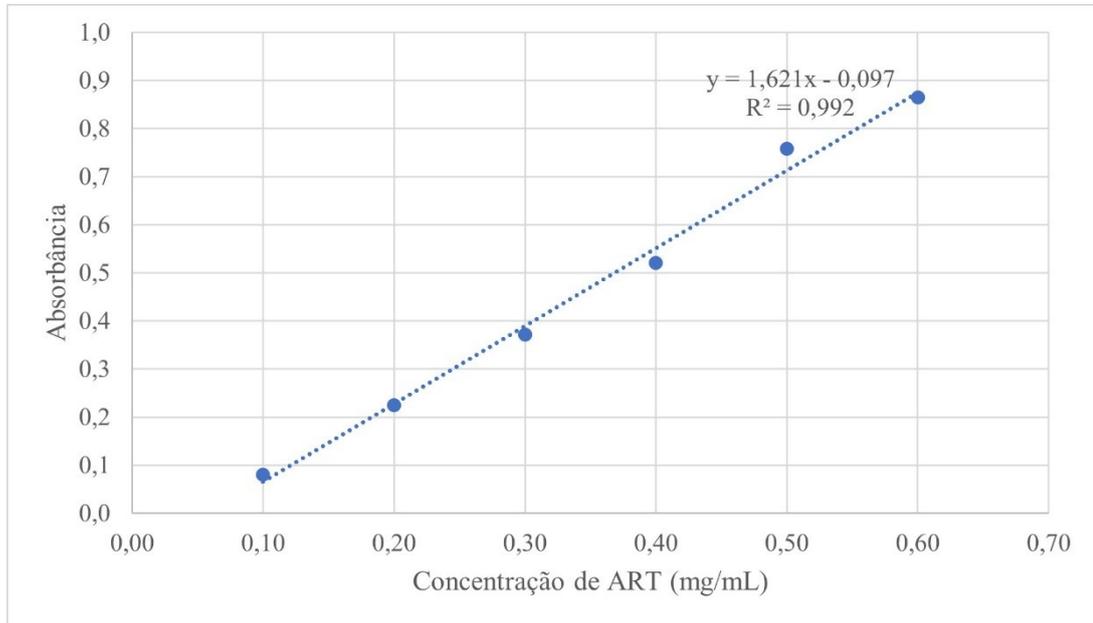
GRIMM, L. A.; DEFALCO, S. L.; PORTO, B.; SOUSA, A. A. U. de; SOUZA, S. M. de A. G. U. de; VALLE, R. C. S. C. . **ENZYMATIC TREATMENT FOR SUSTAINABLE COTTON TEXTILE PROCESSING: A GREEN APROACH.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOTECNOLOGIA INDUSTRIAL, 1., 2024, Florianópolis. Artigo de Pesquisa Experimental. Florianópolis: Congresso Brasileiro de Biotecnologia Industrial, 2024. p. 1-3.

GRIMM, L. A.; HOBOLT, G.; LIMA, J. S.; PORTO, B.; IMMICH, A. P. S.; VALLE, R. C. S. C.. **AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE DE AMILASE FRENTE AOS PARÂMETROS DE PROCESSO DE BIODESENGOMAGEM.** In: CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 4., 2023, Diamantina. Anais [...] . Diamantina: Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, 2023. p. 1-6. Disponível em: <https://even3.blob.core.windows.net/anais/652316.pdf>. Acesso em: 19 out. 2024.

DEFALCO, S.; GRIMM, L. A. ; VALLE, R. C. S. C. ; SOUZA, S. M. A. G. U. ; SOUZA, A. A. U. . **REUTILIZAÇÃO DE ENZIMAS NA BIOPURGA DE TECIDOS DE MALHA DE ALGODÃO? ROTA VERDE NO BENEFICIAMENTO TÊXTIL.** QUÍMICA TÊXTIL, v. julho 2023, p. 8-27, 2023.

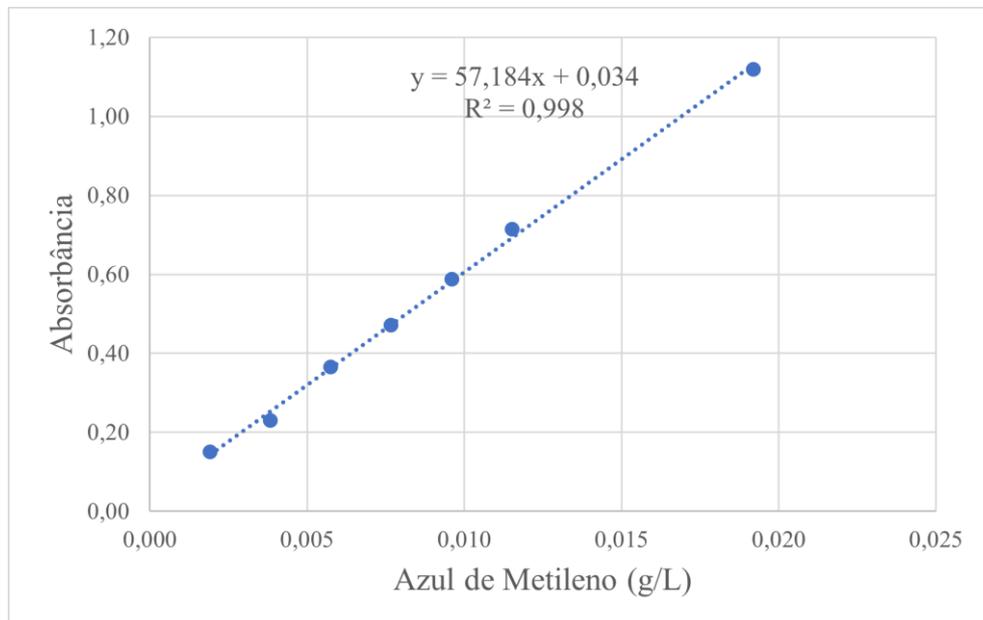
APÊNDICE A – CURVAS DE CALIBRAÇÃO

Figura A.1 – Curva de calibração de concentração de glicose.



Fonte: a autora (2024).

Figura A.2 – Curva de calibração de concentração do corante azul de metileno



Fonte: a autora (2024).