



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA TÊXTIL

Franciele Lemes Rosa

ESTUDO CINÉTICO DO PRÉ-TRATAMENTO DE ALGODÃO CRU COM
PECTINASE

BLUMENAU

2023

Franciele Lemes Rosa

**ESTUDO CINÉTICO DO PRÉ-TRATAMENTO DE ALGODÃO CRU COM
PECTINASE**

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

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

BLUMENAU

2023

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

Rosa, Franciele Lemes

Estudo cinético do pré-tratamento de algodão cru com pectinase / Franciele Lemes Rosa ; orientadora, Rita de Cássia Siqueira Curto Valle, 2023.

67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia Têxtil, Blumenau, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Biopurga. 3. Pectinase. 4. Processo enzimático. 5. Purga alcalina. I. Valle, Rita de Cássia Siqueira Curto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Têxtil. III. Título.

Franciele Lemes Rosa

Estudo cinético do pré-tratamento de algodão cru com pectinase

Este Projeto Final de Curso II foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Têxtil, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Têxtil.

Blumenau, 01 de dezembro de 2023.



Documento assinado digitalmente

Grazzella Cristina Oliveira de Aguiar

Data: 05/12/2023 10:08:28-0300

CPF: ***.439.299-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Grazzella Cristina Oliveira de Aguiar, Dr^a.

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Rita de Cássia Siqueira Curto Valle

Data: 12/12/2023 08:31:12-0300

CPF: ***.303.918-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Rita de Cássia Siqueira Curto Valle, Dr^a.
Orientadora

Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Cristiane da Costa

Data: 05/12/2023 10:29:29-0300

CPF: ***.369.219-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Cristiane da Costa, Dr^a.
UFSC - DET



Documento assinado digitalmente

Odinei Hess Gonçalves

Data: 05/12/2023 10:03:46-0300

CPF: ***.270.279-**

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Odinei Hess Gonçalves, Dr.

UFSC - DET

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, desejo expressar minha profunda gratidão a Deus por Sua constante bênção e por me conceder saúde, capacitando-me a perseguir meus objetivos. Agradeço imensamente à minha amada família, meus pais Lucineia e Aguinaldo, meus irmãos Lucas e William, bem como ao meu querido marido Emerson, que sempre me apoiaram e encorajaram em minha jornada.

Não posso deixar de expressar minha sincera gratidão à minha amiga Isabela, por todos os preciosos momentos que compartilhamos durante nossa trajetória acadêmica.

Também sou imensamente grata aos professores Rita, Sílvia e José Alexandre por seus valiosos ensinamentos e apoio.

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) merece meu reconhecimento por disponibilizar todas as ferramentas necessárias para a aquisição do conhecimento que adquiri ao longo desta jornada. Também estendo meus agradecimentos à Bruna Lyra Colombi pelo trabalho inspirador que me serviu de base e referência. Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento. Cada ato de bondade e auxílio moldou minha jornada e me ajudou a me tornar quem sou hoje.

Por fim, estendo meus agradecimentos a uma pessoa muito especial, você, caro leitor, que dedicou parte do seu tempo para percorrer as páginas do meu TCC. Espero sinceramente que este trabalho possa fornecer o conhecimento que você procura e que tenha sido uma experiência enriquecedora para você.

*“Cada descoberta nova da ciência é uma porta nova
pela qual encontro mais uma vez Deus, o autor dela.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

A fibra de algodão cru possui diversas impurezas antes de passar por tratamentos, as quais interferem na sua capacidade de absorção de água. Essa hidrofobicidade prejudica os processos de tingimento e resulta em manchas e outros problemas. Para remover essas impurezas, é necessário submeter o algodão a um processo denominado purga, que visa eliminar a camada mais externa da fibra, a cutícula, cuja composição majoritária é de pectina e óleos e graxas. A purga convencionalmente empregada é alcalina, utilizando hidróxido de sódio e tensoativos como agentes e temperatura na ordem de 90 °C. No entanto, este método apresenta um ambiente agressivo que causa danos tanto à fibra quanto ao meio ambiente. Com o intuito de reduzir os riscos associados à purga convencional, propõe-se a utilização da biopurga, um processo baseado em enzimas. Neste trabalho, a enzima pectinase foi utilizada para realizar a purga enzimática para a remoção das impurezas do algodão sem prejudicar a fibra. Além disso, esse método é controlado e opera em condições menos severas de temperatura e pH. A abordagem enzimática apresenta diversas vantagens, destacando-se o baixo impacto ambiental, uma das principais preocupações enfrentadas pela indústria atualmente. Ao longo deste estudo de conclusão de curso, será apresentada a análise cinética da enzima pectinase no processo de purga do algodão cru. O comportamento da enzima em sistema heterogêneo passa por aspectos de transferência de massa ainda pouco explorados. Para investigar os efeitos do sistema sobre o processo de purga da malha de algodão cru, variou-se a concentração da enzima pectinase entre 0,25 g/L a 1,5 g/L e a agitação em 50 rpm, 100 rpm e 200 rpm. Todo o processo ocorreu a 55 °C, pH 8,5, por 30 minutos, e a resposta foi a remoção da pectina utilizando a reação com azul de metileno. A avaliação de toda a mistura considerou as limitações difusivas. Os resultados indicaram que a agitação suficiente ocorreu a 100 RPM com uma concentração de enzima de 0,5 g/L. Concluiu-se que o estudo hidrodinâmico foi essencial para a compreensão do processo de biopurga do algodão.

Palavras-chave: Biopurga; Processo enzimático; Pectinase; Purga alcalina; Algodão.

ABSTRACT

Raw cotton fiber contains several impurities before undergoing treatments, which interfere with its water absorption capacity. This hydrophobicity harms dyeing processes and results in stains and other problems. To remove these impurities, it is necessary to subject the cotton to a process called purging, which aims to eliminate the outermost layer of the fiber, the cuticle, whose majority composition is pectin and oils and greases. The purge conventionally used is alkaline, using sodium hydroxide and surfactants as agents and a temperature of around 90 °C. However, this method presents an aggressive environment that causes damage to both the fiber and the environment. In order to reduce the risks associated with conventional purging, it is proposed to use biopurge, a process based on enzymes. In this work, the pectinase enzyme was used to perform enzymatic purging to remove impurities from cotton without harming the fiber. Furthermore, this method is controlled and operates under less severe temperature and pH conditions. The enzymatic approach has several advantages, highlighting the low environmental impact, one of the main concerns currently faced by the industry. Throughout this course completion study, the kinetic analysis of the pectinase enzyme in the raw cotton purging process will be presented. The behavior of the enzyme in a heterogeneous system involves aspects of mass transfer that are still little explored. To investigate the effects of the system on the purging process of raw cotton mesh, the concentration of the pectinase enzyme was varied between 0.25 g/L and 1.5 g/L and agitation at 50 rpm, 100 rpm and 200 rpm. The entire process took place at 55 °C, pH 8.5, for 30 minutes, and the response was the removal of pectin using the reaction with methylene blue. The evaluation of the entire mixture considered diffusion limitations. The results indicated that sufficient agitation occurs at 100 rpm with an enzyme concentration of 0,5 g/L. It was concluded that the hydrodynamic study was essential for understanding the cotton biopurge process.

Keywords: Biopurge; Enzymatic process; Pectinase; Alkaline purging; Cotton.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Visão geral das estruturas em camadas da fibra..... | 14 |
| Figura 2: Microfotografia da fibra do algodão: (a) seção transversal e (b) seção longitudinal | 15 |
| Figura 3: Representação esquemática da estrutura da pectina | 18 |
| Figura 4: Modelo do mecanismo da reação enzimática da pectina presente na cutícula da fibra | 25 |
| Figura 5: Perfil de aquecimento da Biopurga com pectinase BioPrep® 3000 L..... | 31 |
| Figura 6: Perfil de aquecimento da interrupção enzimática..... | 31 |
| Figura 7: Perfil de aquecimento para determinar a remoção de pectina..... | 32 |
| Figura 8: Estrutura química da pectina..... | 39 |
| Figura 9: Estrutura química do Azul de Metileno..... | 40 |
| Figura 10: Curva de calibração do azul de metileno | 40 |
| Figura 11: ANOVA para pectina residual em algodão biopurgado | 43 |
| Figura 12: Efeito da concentração de enzima sobre o conteúdo de pectina residual em algodão biopurgado | 44 |
| Figura 13: Efeito da agitação sobre o conteúdo de pectina residual em algodão biopurgado.. | 45 |
| Figura 14: Efeito do tensoativo sobre o conteúdo de pectina residual em algodão biopurgado | 46 |
| Figura 15: Interação entre os fatores agitação e tensoativos do sistema de biopurga de algodão com pectinase..... | 47 |
| Figura 16: Ajuste do modelo de Chrastil das amostras 0,25 g/L, com Berol e 100 RPM..... | 49 |
| Figura 17: Ajuste do modelo de Chrastil das amostras 0,25 g/L, sem Berol e 100 RPM..... | 50 |
| Figura 18: Ajuste do modelo de Chrastil das amostras 1,5 g/L, com Berol e 100 RPM..... | 51 |
| Figura 19: Ajuste do modelo de Chrastil das amostras 1,5 g/L, sem Berol e 100 RPM..... | 51 |
| Figura 20: Comparação de dados de difusividade com e sem Berol, 100 RPM..... | 52 |
| Figura 21: Comparação de difusividade com e sem Berol sob diferentes níveis de agitação.. | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Condições experimentais..... | 29 |
| Tabela 2: Concentrações do azul de metileno e absorvância lida a 663 nm..... | 33 |
| Tabela 3: Comparação das propriedades físico-químicas das amostras de algodão..... | 36 |
| Tabela 4: Resultado das análises de pectina residual das amostras de malha de algodão nos tratamentos enzimáticos com variação de concentração de enzima, agitação e presença de tensoativo | 42 |
| Tabela 5: Estudo da difusividade do azul de metileno sob variações de concentração e agitação (RPM)..... | 48 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 OBJETIVO..... | 13 |
| 1.1.1 Objetivo geral..... | 13 |
| 1.1.2 Objetivo específico..... | 13 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 13 |
| 2.1 ALGODÃO..... | 13 |
| 2.1.1 Estrutura morfológica..... | 14 |
| 2.1.2 Composição química..... | 17 |
| 2.2 PROCESSO PRODUTIVO TÊXTIL..... | 19 |
| 2.2.1 Purga convencional..... | 19 |
| 2.2.2 Enzima pectinase..... | 21 |
| 2.2.3 Processo enzimático..... | 24 |
| 2.3 FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA E ESTUDO CINÉTICO..... | 26 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 28 |
| 3.1 MATERIAL..... | 28 |
| 3.2 METODOLOGIA..... | 29 |
| 3.2.1 Impregnação da Enzima Pectinase..... | 29 |
| 3.2.2 Determinação da pectina residual..... | 32 |
| 3.2.3 Curva de calibração..... | 33 |
| 3.2.4 Perda de massa..... | 34 |
| 3.2.5 Análise Estatística..... | 34 |
| 3.2.6 Análise da Difusividade por Meio do Modelo Cinético de Chrastil..... | 34 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 35 |
| 4.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS..... | 35 |
| 4.1.1 Grau de remoção de pectina..... | 39 |
| 4.1.2 Curva de Calibração..... | 40 |
| 4.1.3 Perda de massa..... | 40 |
| 4.2 ANÁLISE DO TEOR DE PECTINA RESIDUAL..... | 41 |
| 4.3 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE DIFUSIVIDADE E VERIFICAÇÃO DE AJUSTE AO MODELO CINÉTICO PROPOSTO POR CHRASTIL..... | 47 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 55 |
| REFERÊNCIAS..... | 57 |

1. INTRODUÇÃO

Para fundamentar os valores entrelaçados nos níveis estudados, este trabalho se apoia nos fundamentos apresentados por Bruna Lyra Colombi em sua tese, intitulada Biopreparação enzimática de malha de algodão: avaliação de parâmetros processuais e reuso da solução enzimática. A pesquisa de Colombi *et al.* (2021) oferece uma análise aprofundada dos fatores que influenciam os valores nesses contextos específicos, estabelecendo assim uma base sólida para a compreensão do tema em questão.

No cenário do beneficiamento primário do algodão, uma etapa vital assume o protagonismo: o pré-tratamento. Sua missão primordial é a remoção de impurezas que aderem às fibras, notadamente ceras e pectinas, que conferem a essas fibras uma natureza hidrofóbica. Essa fase prepara as fibras para as etapas subsequentes do processo, incluindo tingimento, estamparia e acabamento final (Rocha, 2020).

A inclusão das enzimas no universo da indústria têxtil remonta a 1857, marcando o ponto de partida para um campo de pesquisa em crescimento constante. O intuito deste estudo é duplo: reduzir os impactos ambientais decorrentes das práticas têxteis e elevar a qualidade das fibras utilizadas. O desenvolvimento de enzimas surge como uma tecnologia estabelecida, evidenciada pela multiplicidade de aplicações que abrange e pelo contínuo crescimento na diversidade de novos processos (Vogel *et al.*, 2019).

Cavaco-Paulo *et al.* (2003) apontam que produtos enzimáticos degradadores de pectina chegaram ao mercado com o objetivo de revolucionar o processamento do algodão, com vistas a suprimir o uso generalizado da lavagem alcalina, amplamente reconhecida por seu impacto ambiental adverso. Paralelamente, Rajulapati *et al.* (2020) sublinham que os processos enzimáticos ascendem em relevância na indústria têxtil, estabelecendo-se como valiosas ferramentas biotecnológicas.

O tratamento de têxteis com enzimas surge como um campo multidisciplinar em franca expansão, demandando um conhecimento profundo em tecnologia têxtil e enzimologia por parte dos engenheiros. A motivação subjacente à substituição dos métodos químicos tradicionais reside na crença de que os tratamentos enzimáticos resultam em economia de energia, já que operam em temperaturas mais brandas (Hardin, 2010).

No procedimento convencional de purga alcalina, o substrato têxtil sofre uma série de tratamentos químicos antes de ingressar nas fases finais do beneficiamento, garantindo sua adequação a esses processos e conferindo-lhe hidrofiliabilidade. Entretanto, devido ao meio

alcalino utilizado na purga, a água residual resultante exibe um pH elevado, o que exige sua neutralização (Shahid *et al.*, 2016).

As desvantagens associadas à purga alcalina instigam a busca por alternativas para o algodão e outras fibras celulósicas. O uso de enzimas se destaca por proporcionar economia de energia, ser compatível com processos e equipamentos e simplificar o tratamento da água residual (Nierstrasz *et al.*, 2010).

A industrialização, ao conquistar ímpeto, frequentemente desencadeia impactos ambientais potencialmente irreversíveis devido à falta de planejamento e ao uso indiscriminado de recursos, sejam eles renováveis ou não. Em muitos casos, a ausência de regulamentação e fiscalização eficaz resulta em desastres ambientais em diversas indústrias.

A aplicação de processos enzimáticos representa uma alternativa poderosa para mitigar esses impactos ambientais. Esses processos, ao não alterarem substancialmente os procedimentos convencionais, podem inclusive elevar a qualidade dos produtos têxteis, além de reduzirem o consumo de água, energia e produtos químicos (Ramadan, 2008). Isso simplifica o tratamento dos efluentes, tornando-os mais adequados para serem devolvidos ao meio ambiente (Aly; Moustafa; A Hebeish, 2004).

O mecanismo das reações enzimáticas é influenciado por diversos fatores, a citar as características do substrato, natureza das enzimas e seus mecanismos de reação e interação (sinergismo, estrutura, adsorção, etc.) e condições de processo (como pH, temperatura, composição do sistema, agitação). Esses aspectos devem ser considerados em estudos enzimáticos (Pratto *et al.*, 2015).

Apesar da já estabelecida eficiência do uso da pectinase em processos de biopurga, com inúmeros trabalhos publicados, a hidrólise da pectina presente na cutícula do algodão ocorre em sistema heterogêneo, ou seja, envolve substrato insolúvel e enzimas solúveis. No caso da malha de algodão, há um formato flexível cujas características físico-químicas do material tornam complexa a interação físico-química entre a enzima e o substrato. Para sistemas heterogêneos, deve-se considerar a possibilidade de limitações difusivas, sendo o modelo proposto por Chrastil e Wilson (1982) uma alternativa para avaliação de estudo cinético.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Variar experimentalmente as condições do processo de biopurga da malha de algodão 100% cru, de forma a obter a variação constante de difusividade do modelo de Chrastil e Wilson para misturas heterogêneas.

1.1.2 Objetivo específico

- Descrever um estudo cinético da enzima pectinase avaliando dois processos com e sem surfactante em concentrações distintas de enzima e agitações.
- Analisar o teor de pectina residual das amostras com e sem utilização do surfactante como tratamento.
- Analisar as variações propostas nas condições do processo, utilizando o modelo cinético de Chrastil como referência, para interpretar empiricamente as dinâmicas observadas.

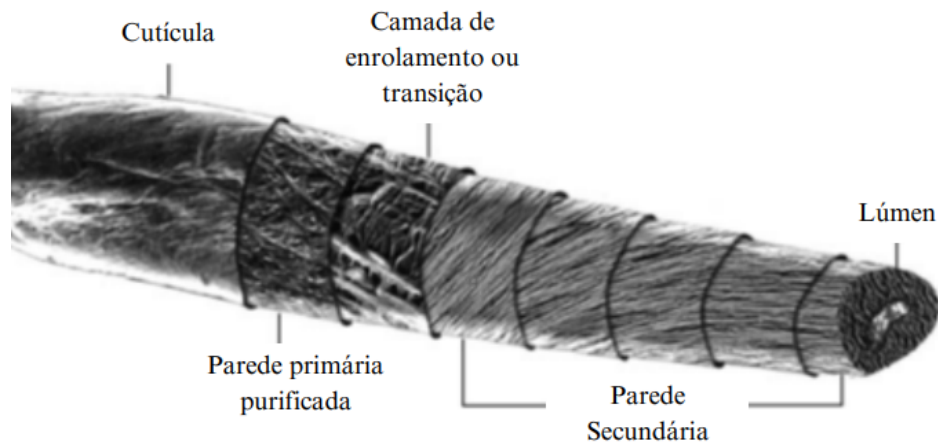
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ALGODÃO

De acordo com Singh *et al.* (2018), o algodão é a fibra natural mais amplamente utilizada e importante nos dias de hoje, com uma história que se estende por mais de sete mil anos. Buainain *et al.* (2007) destacam que a indústria têxtil é o setor que mais consome algodão, representando uma parcela significativa da produção algodoeira. O algodão é amplamente utilizado na indústria têxtil, incluindo aplicações em móveis e na indústria automobilística, sendo a fiação o principal setor consumidor, absorvendo cerca de 60% da produção mundial de algodão (Araújo *et al.*, 2007).

A fibra do algodão maduro apresenta uma capa não celulósica chamada cutícula, desempenhando a função de proteção, conforme observado na Figura 1. Durante o desenvolvimento da fibra, a estrutura da parede primária passa por mudanças substanciais, sendo responsável pela manutenção da integridade e contribuindo significativamente para a resistência do algodão (Etters, 1999).

Figura 1: Visão geral das estruturas em camadas da fibra



Fonte: Adaptado de Lewin (2007)

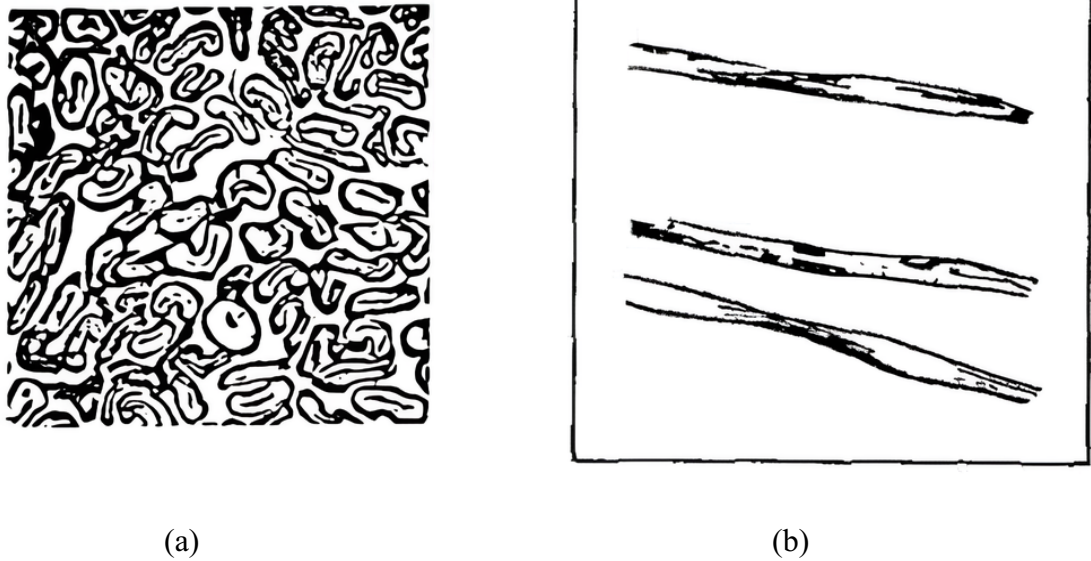
Karmakar (1999) destaca que a limpeza industrial do tecido remove a maior parte da cutícula, porém, essa camada possui funções relevantes durante a fiação das fibras em fio e a tecelagem do fio em tecido. O principal objetivo da limpeza é eliminar as ceras, que bloqueiam o acesso de moléculas, como corantes, ao interior da fibra de algodão.

2.1.1 Estrutura morfológica

De acordo com Lewin (2007), o algodão é uma fibra única, apresentando uma estrutura que se estende desde sua parede primária multicomponente até a parede secundária de celulose pura e o lúmen.

Para visualizar mais detalhadamente a estrutura do algodão, a Figura 2 apresenta microfotografias da fibra. Na seção transversal (Figura 2a), nota-se a disposição interna dos componentes, enquanto na seção longitudinal (Figura 2b), a fibra revela sua extensão ao longo do eixo.

Figura 2: Microfotografia da fibra do algodão: (a) seção transversal e (b) seção longitudinal



Fonte: (Marjory, 1977)

A organização das unidades de fibrilas confere à fibra propriedades distintas, tornando-a processável, resistente e confortável no contexto têxtil. A parede externa da fibra, conhecida como parede celular ou cutícula-parede primária, apresenta uma estrutura notavelmente complexa (Furlan, 2012).

Segundo Mojsov (2012), a cutícula constitui uma camada fina e amorfa, representando cerca de 2,5% do peso total da fibra. Essa camada é constituída por uma rede interna de microfibrilas, que se dispõem de maneira aleatória em uma matriz contendo uma variedade de componentes não celulósicos, tais como ceras, pectinas, proteínas e outros materiais (Lewin, 2007).

Os componentes não celulósicos da parede celular do algodão desempenham um papel crucial na aparência e nas propriedades da fibra. Esses componentes conferem à superfície da fibra uma aparência não fibrilar e, ao mesmo tempo, proporcionam uma proteção hidrofóbica no ambiente, criando uma superfície lubrificada durante o processamento (Li; Hardin, 1997).

É importante destacar que, como mencionado por Li e Hardin (1997), o componente ceroso da parede primária desempenha um papel significativo. Sua remoção parcial é necessária para permitir que produtos químicos de acabamento e tingimento acessem efetivamente o corpo da fibra, influenciando diretamente as propriedades finais do produto.

Dentro da parede primária, uma fina camada, chamada de camada de enrolamento, consiste em bandas de microfibrilas helicoidais dispostas em uma rede rendilhada, que tem sido associada tanto à parede primária quanto à parede secundária. Durante o processo de

fragmentação da fibra, é comum que a camada de enrolamento se separe da parede primária. No entanto, acredita-se que a celulose presente na camada sinuosa seja depositada durante o estágio de alongamento decrescente, quando a síntese da parede secundária tem início, resultando em uma possível ligação química mais íntima com a parede secundária (Lewin, 2007).

A complexa rede fibrilar entrelaçada da parede primária e o tapete de fibras da camada sinuosa, localizado logo abaixo, fornecem uma cobertura dinâmica que permite uma expansão limitada. No interior da parede secundária, as microfibrilas estão orientadas predominantemente ao longo do eixo da fibra. Essa cobertura protege as fibrilas da parede secundária contra forças de separação lateral durante o processo de inchamento. Enquanto a camada de enrolamento da parede primária permanecer intacta, a parte interna da fibra fica menos suscetível a danos. O corpo principal da fibra, conhecido como parede secundária, é composto por camadas de fibrilas quase paralelas dispostas em uma formação espiral concêntrica (Silva, 2006).

As camadas altamente compactadas de fibrilas na parede secundária são compostas principalmente de celulose pura e representa aproximadamente 91,5% do peso da fibra e possui um índice de cristalinidade de cerca de 70%, o que a torna responsável pela resistência mecânica das fibras (Paiva e Frollini, 2000; Eichhorn *et al.*, 2009; Mohanty *et al.*, 2000).

Fibras que não passaram pelo processo de desenvolvimento da parede secundária podem se apresentar apenas em forma de aglomerados, sem exibirem uma estrutura individual completa. A rigidez do corpo da fibra é conferida pelo desenvolvimento da parede secundária, o que contribui para suas propriedades físicas. A relação direta entre a espessura da parede secundária e as propriedades da fibra, como resistência, capacidade de tingimento e reatividade, foi destacada por Mojsov (2012). Essa espessura está intrinsecamente ligada ao grau de maturidade da fibra.

Os espaços abertos dentro da fibra, ou porosidade, funcionam como locais de entrada para líquidos, determinando a acessibilidade da fibra aos mesmos. A compactação diferencial das fibrilas gera variações nas conexões fibrilares, afetando a permeabilidade e a acessibilidade nas áreas internas da fibra. Essas áreas também contêm resíduos secos do protoplasma celular, que são a principal fonte de materiais não celulósicos na fibra, excluindo os presentes na parede primária. A parede do lúmen, uma fina camada, define o limite interno da célula da fibra. A abertura do lúmen ocupa aproximadamente 5% da área transversal da fibra madura (Silva, 2006).

As fibras secas com paredes secundárias relativamente espessas apresentam uma seção

transversal em forma de feijão, que é comumente associada à estrutura das fibras de algodão. Esse processo de secagem e encolhimento resulta na formação de fibras têxteis de algodão enroladas e não uniformes. Embora essas fibras tenham sua origem na fibra biológica viva, sua estrutura no estado seco é significativamente diferente daquela no estado vivo e hidratado (Pensupa *et al.*, 2017).

2.1.2 Composição química

Segundo Nierstrasz (2010), a fibra de algodão é composta principalmente de celulose, correspondendo a aproximadamente 95% de sua composição. Os 5% restantes consistem em uma complexa mistura química, que engloba proteínas, aminoácidos, substâncias pécnicas, ceras e hemicelulose.

Enquanto componentes de baixo peso molecular podem ser removidos por tratamento térmico e água, a eliminação dos demais requer procedimentos mais rigorosos, frequentemente envolvendo o uso de hidróxido de sódio (NaOH) (Varadarajan; Venkatachalam, 2016).

A camada externa da fibra de algodão desempenha um papel vital, funcionando como um revestimento protetor desenvolvido pelas células vegetais como mecanismo de defesa contra a degradação ambiental (Nierstrasz, 2010)

Além disso, a fibra crua contém sais inorgânicos, como fosfatos, carbonatos e óxidos, que são referidos como cinzas. A presença de metais alcalinos, como cálcio e magnésio, que são encontrados em quantidades significativas no algodão, representa uma preocupação. Outro elemento indesejado é o ferro, que pode influenciar negativamente na qualidade do tingimento. O problema mais grave é a formação de complexos dos corantes com esses metais, o que resulta em consequências adversas para a uniformidade da cor, matiz e, às vezes, resistência ao desgaste. O ferro, em particular, contribui para a corrosão de equipamentos e degradação das fibras de algodão nos processos de branqueamento químico (Picolli, 2008).

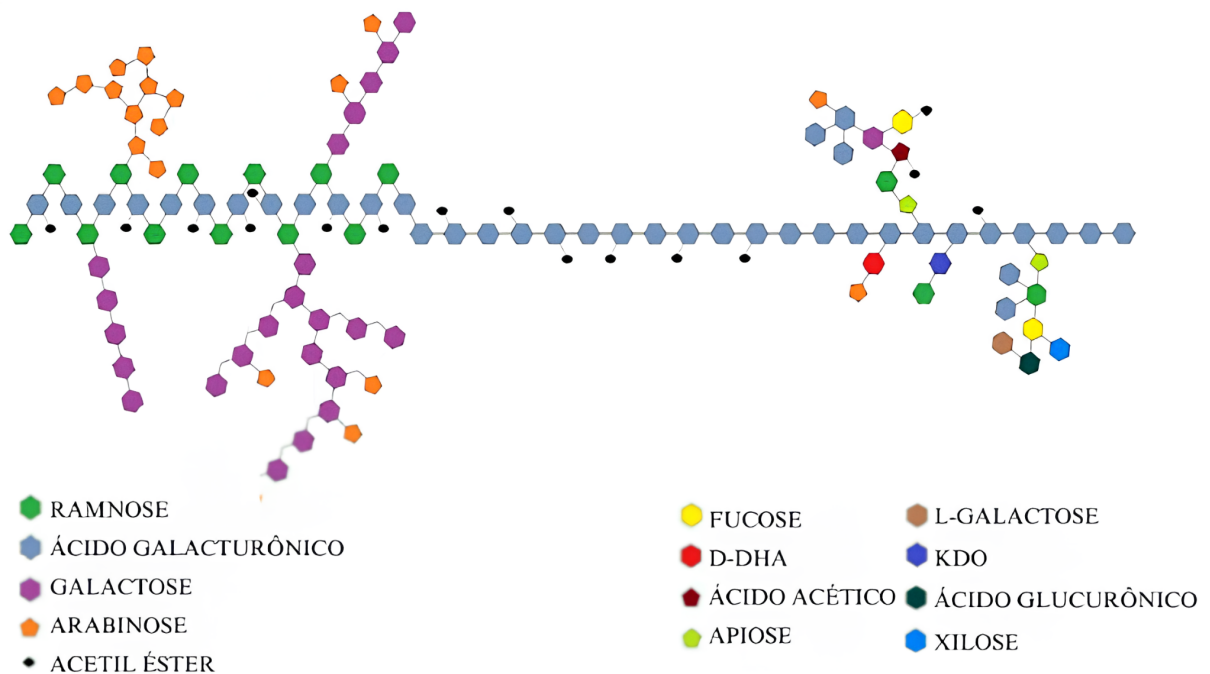
A pectina é predominantemente localizada nas regiões da parede celular primária do algodão, atuando como um gel de preenchimento de espaços. Este polímero de cadeia longa possui uma estrutura química composta por dezessete monossacarídeos distintos. A pectina é caracterizada por sua elevada massa molecular, natureza amorfa, insolubilidade em água e solubilidade em soluções alcalinas. Sua hidrólise final resulta no ácido galacturônico (Canteri *et al.*, 2012). As propriedades físico-químicas da pectina estão diretamente ligadas à sua

estrutura, influenciando suas diversas aplicações (Dao *et al.*, 2021).

Com uma composição que engloba, no mínimo, 65% de resíduos de ácido galacturônico, a pectina exibe pontos de ramificação com predominância de cadeias laterais compostas por arabinose e galactose (Mao *et al.*, 2020).

Li e Hardin (1997) observam que a marcante metilação, atingindo 85% do ácido poligalacturônico, confere-lhe uma notável hidrofobicidade. Essa característica contribui para a limitada absorção de água pelo algodão em seu estado bruto, evidenciando a complexidade das propriedades físico-químicas da pectina e seu papel distintivo na matriz da parede celular vegetal.

Figura 3: Representação esquemática da estrutura da pectina



Fonte: Adaptado de Guimarães *et al.* (2013)

2.2 PROCESSO PRODUTIVO TÊXTIL

A cadeia têxtil segue um processo produtivo que, de acordo com Leão *et al.* (2002), envolve etapas bem definidas. Inicialmente, a matéria-prima é direcionada para a fiação, prosseguindo para a tecelagem plana ou malharia e, por fim, chegando ao acabamento, abastecendo, assim, o setor de confecção.

O processo de beneficiamento têxtil, visa aprimorar propriedades que envolvem aspectos como cor, aparência, brilho, textura, resistência e estabilidade dimensional, conforme destacado por Araújo e Castro (1986).

Esse processo de beneficiamento pode ser subdividido em três etapas, conforme descrito por Zanasi (2009):

1. Beneficiamento primário: preparação inicial do tecido para as etapas seguintes.
2. Beneficiamento secundário: envolve a tintura ou estamparia do tecido.
3. Beneficiamento terciário: compreende uma série de procedimentos com o objetivo de conferir ao material maior estabilidade dimensional, uma textura mais agradável ao toque e características especiais, como a impermeabilização à água, como também mencionado por Araújo e Castro (1986).

O processo químico inicial aplicado a fibras de algodão e outras fibras vegetais é a purga, que visa à remoção de substâncias não celulósicas presentes nas camadas externas, incluindo a cutícula da parede primária (Besegatto *et al.*, 2018). Dentre essas substâncias, as ceras e as pectinas desempenham um papel crucial, conferindo hidrofobicidade à fibra e reduzindo sua capacidade de absorção de água. Isso pode prejudicar a eficiência e a uniformidade dos processos de tingimento e acabamento realizados em condições aquosas, conforme apontado por Lin e Hsieh (2001). Para tornar o substrato mais hidrofílico, a purga convencional é o método amplamente empregado, envolvendo a remoção dessas substâncias. No entanto, existe também o método enzimático, que se apresenta como uma alternativa mais sustentável para esse fim.

2.2.1 Purga convencional

Conforme Santana *et al.* (2001), cerca de 10% do peso total do algodão é composto por impurezas naturais, abrangendo elementos como proteínas, pectina, ceras, gorduras e mesmo fragmentos de sementes e folhas. Essas impurezas desempenham um papel crucial na conferência de hidrofobicidade às fibras de algodão e na atribuição de uma coloração amarelada. No entanto, é fundamental compreender que os processos subsequentes de tingimento e estampagem requerem que o tecido de algodão seja altamente hidrofílico, a fim de garantir a absorção uniforme de corantes e resultados satisfatórios.

Para alcançar a hidroflicidade desejada durante a limpeza do algodão, a remoção de elementos não celulósicos é essencial. Isso inclui a cutícula, que contém ceras e gorduras, e a parede primária, que pode conter pectina, proteína e ácidos orgânicos (Santana *et al.*, 2001).

É importante salientar que a limpeza não se restringe à eliminação das impurezas naturais. Ela abrange também a remoção de substâncias que podem ter aderido às fibras durante a produção do fio ou do tecido. Essa abordagem detalhada de limpeza é fundamental para garantir a qualidade do algodão, independentemente da origem das fibras naturais, conforme enfatizado por Agrawal (2005). A remoção eficaz de impurezas não celulósicas e outras substâncias indesejadas é uma etapa vital no processamento do algodão, assegurando que as fibras estejam prontas para receber os corantes de forma uniforme e alcançar os resultados desejados nas etapas subsequentes da produção têxtil.

Até hoje, a limpeza alcalina do algodão é amplamente utilizada para remover ou romper a cutícula da fibra, tornando-a mais absorvente para o beneficiamento do algodão (Agrawal, 2005).

Embora o hidróxido de sódio seja o agente de limpeza mais comum, alternativas como carbonato de sódio e hidróxido de cálcio também são mencionadas. A limpeza do tecido de algodão é geralmente realizada com uma solução quente (entre 70°C e 100°C) de hidróxido de sódio (aproximadamente 1 mol/L) por até uma hora, variando conforme a qualidade desejada do tecido e as condições iniciais do material. Durante o processo de limpeza, agentes redutores são adicionados para evitar a oxidação da celulose em pH elevado. Agentes umectantes reduzem a tensão superficial da água, facilitando a penetração dos produtos químicos no tecido. Além disso, agentes emulsificantes auxiliam na remoção de materiais cerosos, enquanto agentes quelantes removem íons metálicos polivalentes, como cálcio, magnésio e ferro, que podem prejudicar operações de processamento úmido. Materiais poliméricos também podem atuar como agentes quelantes em processos de preparação contínua. Após a purga, o enxágue e a neutralização com uma grande quantidade de água são essenciais (Einschlag, 2011; Agrawal, 2005).

As desvantagens significativas associadas à limpeza alcalina motivam a busca por alternativas. Esse método requer grandes quantidades de produtos químicos, energia e água, tornando-o dispendioso. A necessidade de neutralizar as águas residuais com produtos químicos ácidos adicionais é uma consequência do uso de altas concentrações de hidróxido de sódio (Agrawal *et al.*, 2007; Losonczy; Csiszár; Szakács, 2004).

Além disso, a limpeza alcalina resulta em uma degradação não específica da celulose, levando a tecidos com menor resistência à tração e, portanto, de qualidade inferior. Este método também representa um risco para os trabalhadores e cria um ambiente de trabalho desagradável. Apesar de sua eficácia e custos relativamente baixos devido ao uso de NaOH, há espaço para melhorias significativas para atender às atuais demandas de eficiência

energética e considerações ambientais (Nierstrasz *et al.*, 2010).

2.2.2 Enzima pectinase

As aplicações industriais de enzimas desempenham um papel fundamental em nosso cotidiano, remontando a tempos ancestrais em que a humanidade descobriu os benefícios de transformar matérias-primas como leite, uvas e grãos em produtos duráveis e saborosos, como iogurte, vinho, cerveja e pão (Tonolli *et al.*, 2021). Naquela época, os microorganismos e enzimas responsáveis por essas transformações eram utilizados de forma inconsciente. No entanto, ao longo da história, o conhecimento sobre enzimas e o desenvolvimento de tecnologias relacionadas à sua adaptação, produção e aplicação melhoraram significativamente. Esse progresso culminou em uma ampla variedade de enzimas que desempenham papéis essenciais em setores que vão desde alimentos e bebidas até química, farmacêutica, biorrefinaria e as indústrias de nutrição humana e animal (Vogel *et al.*, 2019).

Em termos mais técnicos, as enzimas são proteínas que atuam como catalisadores em uma ampla gama de reações químicas e estão presentes em quase todas as formas de vida. Como explicado por Vigneswaran *et al.* (2014), um catalisador é uma substância que aumenta a taxa de uma reação química sem ser consumido ou alterar o resultado global do processo.

A especificidade das enzimas é determinada por interações químicas precisas entre o sítio ativo da enzima e seu substrato correspondente. A plasticidade do sítio ativo é evidenciada pela capacidade de se ajustar ao substrato ou modificar sua conformação para otimizar a interação quando o substrato está presente. Essa flexibilidade é fundamental para a eficiência catalítica das enzimas em diversas reações bioquímicas (Costa; Amorim, 1999). Essa capacidade única das enzimas de catalisar reações específicas é fundamental para uma variedade de aplicações industriais (Calado *et al.*, 2007).

Os processos enzimáticos oferecem uma vantagem ambiental significativa ao alterar as propriedades das fibras têxteis, em comparação com o uso de reagentes químicos, conforme destacado por Monteiro *et al.* (2009). A aplicação de enzimas visa mitigar as condições químicas rigorosas, minimizando os impactos nas fibras e reduzindo a emissão de poluentes no meio ambiente (Chakraborty e Madhu, 2017).

Embora os processos não dependam exclusivamente de enzimas, estas são frequentemente empregadas para complementar o tratamento têxtil, substituindo agentes químicos em algumas etapas. Essa abordagem é adotada devido às limitações operacionais da difusão enzimática nas fibras. As fases mais propícias para aplicação são aquelas em que a

interação profunda da enzima com as fibras não é imperativa, concentrando-se, em vez disso, na superfície. (Basto *et al.*, 2007).

O crescimento do mercado de enzimas ao longo dos anos, de 1875 até os dias atuais, com projeções até 2025, reflete a crescente importância dessas biomoléculas em diversas áreas de aplicação. Na indústria têxtil, as enzimas podem ser empregadas para aprimorar a qualidade e as características dos tecidos, substituindo produtos químicos mais agressivos e contribuindo para a sustentabilidade no setor têxtil (Vogel *et al.*, 2019).

O contínuo crescimento do mercado de enzimas é motivado pela busca por soluções mais sustentáveis, eficazes e ecologicamente amigáveis. À medida que a sociedade se orienta cada vez mais para práticas e produtos sustentáveis, as enzimas desempenham um papel crucial na consecução desses objetivos, contribuindo para a redução de resíduos, a preservação de recursos e o aumento da eficiência nos processos industriais. Portanto, o crescimento do mercado de enzimas reflete não apenas a inovação tecnológica, mas também a conscientização ambiental e a busca por soluções mais responsáveis em várias indústrias (Monteiro *et al.*, 2009).

É amplamente reconhecido que as aplicações industriais de enzimas oferecem substanciais benefícios econômicos e ambientais em comparação com os produtos químicos tradicionalmente utilizados. Estes benefícios abrangem uma ampla gama de aspectos, incluindo a redução dos custos de fabricação, o aumento do rendimento do produto, a melhoria na qualidade do produto, uma maior segurança nas operações, a eficiência energética, a diminuição do uso de produtos químicos e da toxicidade, bem como uma considerável redução nas emissões de gases de efeito estufa e na geração de resíduos (Arbige *et al.*, 2019).

As ferramentas da engenharia enzimática, que têm experimentado desenvolvimentos significativos nos últimos anos, agora estão sendo aplicadas para otimizar os biocatalisadores utilizados em diversos processos na indústria têxtil. No entanto, é importante observar que a evolução dirigida também pode ser empregada para adaptar uma enzima específica sem a necessidade de dados adicionais de natureza bioquímica. Ainda assim, devido ao grande número de variantes geradas, este método pode ser demorado e oneroso. Além disso, frequentemente, os resultados obtidos não podem ser extrapolados de um biocatalisador para outro, mesmo que sejam estrutural ou funcionalmente semelhantes. O elevado investimento de tempo e os custos associados à triagem, aliados à frequente restrição do espectro de substratos das enzimas, podem retardar o progresso rápido da biocatálise. Nas últimas décadas, várias enzimas foram identificadas e otimizadas, utilizando-se qualquer um dos

métodos mencionados, para desempenhar papéis como catalisadores em aplicações industriais na indústria têxtil (Vogel *et al.*, 2019; Lima; Angnes, 1999).

De acordo com Uenojo *et al.* (2007), a pectinase é uma enzima de grande relevância na biotecnologia industrial e encontra ampla aplicação nas indústrias de alimentos e bebidas. As pectinases constituem um grupo de enzimas que desempenham um papel fundamental na degradação de substâncias pécnicas, atuando por meio da hidrólise de ligações glicosídicas ao longo da cadeia carbônica.

No âmbito do processamento químico têxtil, a pectinase é empregada em um estágio prévio ao tratamento do algodão, comumente referido como biopurga. Esse processo visa aumentar a absorção de água do tecido de algodão, tornando-o adequado para etapas posteriores, como a coloração (Aggarwal *et al.*, 2020).

Como explicado por Vigneswaran *et al.* (2014), as enzimas pectinases atuam de maneiras diversas sobre as pectinas, que se encontram nas paredes celulares primárias do algodão.

Embora vários produtos à base de pectinase estejam disponíveis no mercado, a extração de pectinase de novas fontes que possam atender aos requisitos da biopurga continua sendo um campo de pesquisa em andamento (Aggarwal *et al.*, 2020).

Pectinases, também conhecidas como enzimas pectinolíticas, são produzidas por uma diversidade de organismos, incluindo bactérias, leveduras, fungos filamentosos, insetos e plantas, com a finalidade de degradar o heteropolissacarídeo pectina (Maller, 2008). Dada a presença de diferentes formas de pectina nas células das plantas, é necessária a ação de enzimas com diferentes modos de atuação para sua degradação (Gummadi *et al.*, 2003).

A produção em larga escala de pectinases é predominantemente realizada por fungos, com destaque para aqueles do gênero *Aspergillus*, que são amplamente empregados para esse fim (Einschlag, 2011). Os preparados enzimáticos disponíveis no mercado consistem em complexos enzimáticos que incluem todas as enzimas do grupo pectinolítico (Sandri, 2010).

2.2.3 Processo enzimático

A aplicação de enzimas em processos têxteis tem ganhado reconhecimento significativo nos últimos tempos, e isso se deve a vários motivos (Gübitz, 2003). Um dos principais motivos é a eco amigabilidade dos tratamentos enzimáticos, que são ecologicamente corretos, não tóxicos e representam uma alternativa para a conservação de energia. Além disso, as enzimas podem ser aplicadas em praticamente todas as etapas da

fabricação no processamento químico têxtil (Madhu *et al.*, 2017).

Como mencionado anteriormente, a fibra de algodão possui componentes não celulósicos que precisam ser removidos. Esses componentes podem ser eliminados da cutícula e da parede primária por meio de processos enzimáticos em condições pré-determinadas, conhecidos como biopurga. A biopurga remove as impurezas não celulósicas da fibra de algodão sem prejudicar o meio ambiente, uma vez que o processo não envolve o uso de produtos químicos agressivos e ocorre em condições de pH e temperatura não prejudiciais (Kalantzi *et al.*, 2010). Esse processo aumenta a capacidade de absorção do tecido, mantendo a resistência da fibra e é vantajoso para o tingimento e acabamento adequado do tecido (Rajendran *et al.*, 2011).

No entanto, apesar do potencial desses processos, as enzimas têm tido aceitação industrial limitada devido às condições extremas de pH e temperatura frequentemente empregadas no processamento têxtil, o que pode resultar na redução de suas propriedades e eficácia (Madhu *et al.*, 2017).

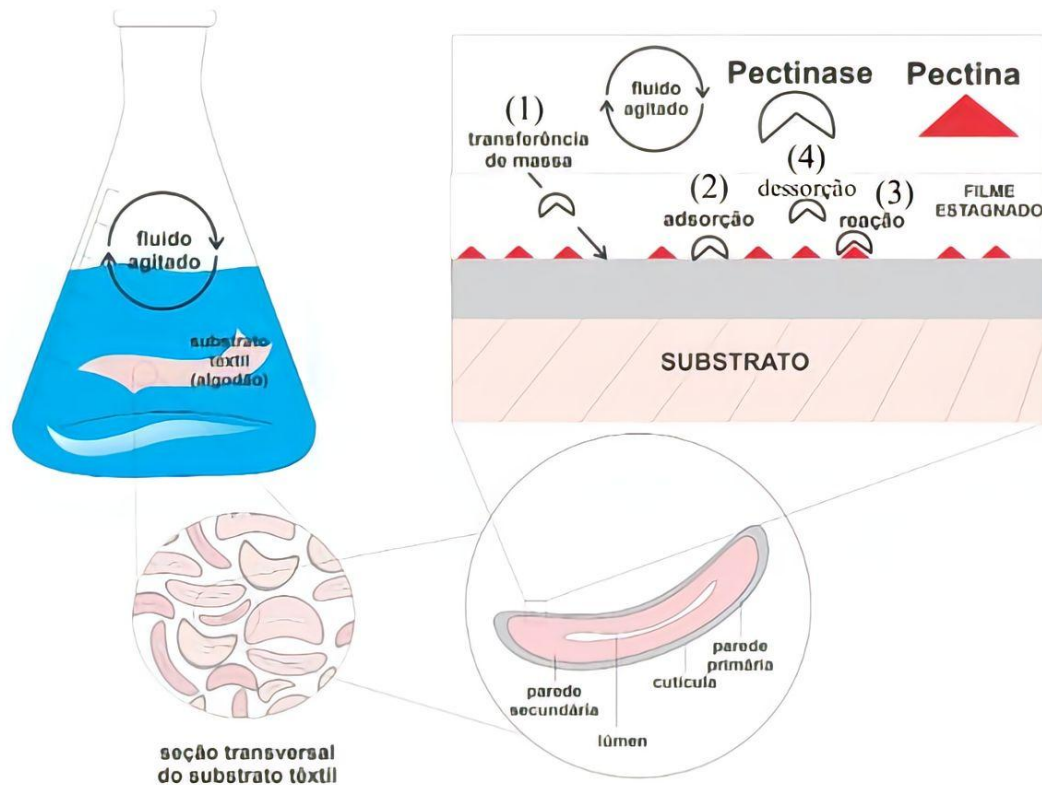
Existem muitos exemplos de reações heterogêneas da pectinase que podem ser tomados como exemplos para a cinética de remoção da pectina da fibra de algodão, considerando que a pectina está apenas na parte superficial da fibra. Em um sistema heterogêneo, a eficiência da reação enzimática depende não apenas de como as enzimas atuam no substrato, mas também da transferência de massa das moléculas de enzima através da camada de fluido estagnado ao redor das fibras. Cada modelo de cinética enzimática possui particularidades que dependem das características do sistema e das hipóteses propostas. É importante que uma representação da cinética enzimática incorpore informações cruciais para a compreensão do sistema catalítico em diferentes situações, sem ser excessivamente complexa na tentativa de abranger todos os fenômenos envolvidos. Vários fatores, como as características estruturais do substrato, as condições do meio de reação e o mecanismo específico da enzima, podem afetar o mecanismo da reação enzimática. Alguns desses fatores estão correlacionados, o que torna difícil quantificar a influência de cada um isoladamente, e muitos fatores influenciam o sistema, mas não podem ser alterados devido às limitações na aplicação das enzimas (Madhu *et al.*, 2017).

As taxas de reação enzimática total da pectina de algodão envolvem as etapas baseadas em Fan e Lee (1983) trabalho aplicado para hidrólise de celulose, conforme mostrado na Figura 4:

(1) Transferência de massa de enzimas da fase fluida para a superfície externa do algodão fibra;

- (2) Adsorção de pectinases e formação do complexo enzima-substrato;
- (3) Reação na superfície do substrato (reação enzimática);
- (4) Dessorção de pectinases da superfície do substrato;

Figura 4: Modelo do mecanismo da reação enzimática da pectina presente na cutícula da fibra



Fonte: A Autora (2023)

A presença de cera natural e a adicionada no processo de fiação é de fato um dos principais desafios no processo enzimático de biopurga, uma vez que essa camada dificulta a penetração da pectinase na camada de pectina da fibra de algodão, afetando negativamente o seu desempenho, como mencionado por Agrawal *et al.* (2007) e Agrawal (2005). Portanto, o sucesso da biopurga depende da utilização de surfactantes (Sawada *et al.*, 1998; Calafell *et al.*, 2004) ou de outros pré-tratamentos, como variações de temperatura (Wang *et al.*, 2007) e o uso de outras enzimas (Nerurkar *et al.*, 2015), a fim de permitir o acesso da pectinase à pectina na fibra de algodão.

É válido destacar que a investigação da cinética de degradação das pectinas no algodão por meio de pectinases ainda é uma área de pesquisa relativamente sub-explorada. A aplicação de modelos matemáticos desempenha um papel essencial na correlação dos dados

cinéticos envolvidos durante a hidrólise enzimática. Além disso, esses modelos fornecem informações valiosas sobre os mecanismos de reação, o que, por sua vez, contribui significativamente para uma compreensão mais profunda do processo.

Conseqüentemente, a superação dos desafios associados à presença de cera na fibra de algodão e o desenvolvimento de modelos matemáticos mais abrangentes representam áreas de pesquisa de suma importância para otimizar e aprimorar a tecnologia de biopurga no contexto do processamento têxtil.

2.3 FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA E ESTUDO CINÉTICO

O estudo da cinética das reações enzimáticas desempenha um papel essencial na compreensão dos mecanismos subjacentes e na otimização de processos.

A equação de Henri-Michaelis-Menten (HMM) tem sido amplamente utilizada como modelo em estudos cinéticos de pectinase em têxteis, conforme relatado por Wan+g *et al.* (2007). No entanto, a aplicação direta da HMM à catálise de pectinase na pectina do algodão (GUO *et al.*, 2017) é desafiada devido à complexidade da reação e à heterogeneidade do substrato. Bailey (1989) propôs uma modificação na equação de HMM para a hidrólise da celulose, onde a velocidade inicial de hidrólise (v_0) é expressa em função da concentração inicial da enzima ($[E]_0$), resultando em uma constante de saturação (K_e) e uma velocidade máxima ($V_{e_{max}}$).

Desta forma, a velocidade inicial da hidrólise pode ser expressa como uma função da concentração inicial da enzima (R. Junior *et al.*, 2011), conforme a equação modificada de Henri-Michaelis-Menten.

$$v_0 = \frac{V_{e_{max}}E_0}{K_e + E_0} \quad (1)$$

Essa modificação oferece uma estrutura teórica mais apropriada para entender as reações de pectinase em malhas de algodão cru (R. Junior *et al.*, 2011). Embora a expressão de taxa do tipo Henri-Michaelis-Menten possa ser aplicada à superfície pectinase-algodão, ela não leva em consideração as características cinéticas resultantes da natureza heterogênea da pectina da fibra de algodão.

Chrastil (1998) explicou a limitação do uso da equação de HMM em reações heterogêneas que envolvem substrato insolúvel e enzima solúvel, onde as curvas de tempo

dependem fortemente das estruturas heterogêneas que limitam a taxa do sistema enzimático, como no caso do têxtil.

No contexto das pectinases usadas para a biopreparação de fibras, o modelo cinético de difusão limitada proposto por Chrastil (R. Junior *et al.*, 2011) apresenta uma abordagem mais precisa.

$$P = P_{\infty}[1 - \exp(-kE_0t)]^n \quad (2)$$

Onde, P e P_{∞} são os produtos em t e no equilíbrio, ou seja, P representa a concentração de Azul de Metileno na amostra, e P_{∞} é a concentração de Azul de Metileno em que a amostra indica estar sem pectina. k é uma constante de velocidade proporcional ao coeficiente de difusão conforme definido pela lei de Fick. E_0 é a concentração inicial da enzima, e n é uma constante de resistência à difusão estrutural (dependente do estérico estrutura do sistema - quando a resistência à difusão é pequena, n tende a 1. Se o sistema é fortemente limitado pela resistência à difusão, n é pequeno.) (R. Junior *et al.*, 2011).

Este modelo considera fatores como a concentração inicial da enzima (E_0), uma constante de resistência à difusão estrutural (n) e a constante de velocidade (k) em relação ao coeficiente de difusão, conforme definido pela Lei de Fick. Carrillo *et al.* (2005) testaram ambos os modelos na hidrólise da celulase da palha de trigo, evidenciando que a concentração inicial da enzima afeta os valores do coeficiente de resistência à difusão estrutural (n).

Além disso, mudanças na superfície do substrato sólido desempenham um papel significativo no transporte difusional, uma vez que as curvas de tempo são fortemente dependentes das estruturas heterogêneas limitantes da velocidade do sistema substrato-enzima. O modelo de Chrastil permite determinar se o sistema enzimático é limitado pela difusão, o que é fundamental para a compreensão das reações em sistemas heterogêneos, como no caso do algodão (R. Junior *et al.*, 2011).

A eficiência da reação enzimática está relacionada à velocidade global da reação, que depende da transferência de massa das moléculas de enzima através da fase fluida estagnada ao redor da fibra de algodão. Agitações aplicadas são necessárias para garantir um maior contato entre enzimas e substratos, evitando que o processo seja limitado pela transferência de massa externa. No entanto, muitos estudos ignoram a transferência de massa externa, colocando a superfície da reação como a etapa global limitante no processo (R. Junior *et al.*, 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Os experimentos foram conduzidos no campus UFSC de Blumenau, nos laboratórios de Meio Ambiente (LABMAM) e Beneficiamento (LABENE).

Utilizou-se o surfactante não iônico Berol® 175, à base de álcool primário natural (com pelo menos 60% de álcool etoxilado), em conjunto com a enzima pectato liase fornecida pela empresa AKMEY. A malha utilizada era de estrutura Jersey, composta por 100% de algodão cru, com uma gramatura de 160 g/m². Foram preparadas 91 amostras, cada uma com massa equivalente a 2,6 gramas e dimensões de 9 cm x 20 cm.

Na etapa inicial do experimento, realizada no Laboratório de Meio Ambiente (LABMAM) com o auxílio de um agitador orbital (SHAKER) da marca NEW LAB, modelo NL-343-01, testou-se a enzima em 5 concentrações distintas, combinadas com 3 variações de agitação, tanto com quanto sem a presença de Berol®. Este experimento foi delineado conforme um plano multifatorial, envolvendo 3 fatores, com combinações do tipo 5 x 3 x 2, totalizando 30 tratamentos executados em triplicata. Uma amostra sem tratamento foi incluída para efeitos de comparação.

Na fase subsequente do experimento, com o objetivo de avaliar a remoção da pectina residual na amostra, utilizou-se a máquina de tingimento IR DYER da marca TEXCONTROL disponível no Laboratório de Beneficiamento (LABENE). Essa máquina auxiliou na quantificação da pectina residual nas amostras, empregando o azul de metileno como indicador de pectina. A leitura foi conduzida por meio de um espectrofotômetro da marca BEL PHOTONICS, modelo UV - M51.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Impregnação da Enzima Pectinase

Inicialmente, foi realizada a preparação de 90 amostras de substratos têxteis. Essas amostras foram submetidas a um processo de esgotamento da enzima pectato liase (BioPrep® 3000 L) usando o equipamento de agitação orbital (SHAKER) e controle de temperatura. As condições experimentais envolviam cinco concentrações de enzima (0,25 g/L, 0,5 g/L, 0,75

g/L, 1,0 g/L e 1,5 g/L), três níveis de agitação, com e sem a presença de Berol®, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1: Condições experimentais

| Amostra | Concentração de enzima (g/L) | Agitação (RPM) | Presença de Berol |
|----------------|---|-----------------------|--------------------------|
| 1 | 0,25 | 50 | Com |
| 2 | 0,25 | 100 | Com |
| 3 | 0,25 | 200 | Com |
| 4 | 0,25 | 50 | Sem |
| 5 | 0,25 | 100 | Sem |
| 6 | 0,25 | 200 | Sem |
| 7 | 0,5 | 50 | Com |
| 8 | 0,5 | 100 | Com |
| 9 | 0,5 | 200 | Com |
| 10 | 0,5 | 50 | Sem |
| 11 | 0,5 | 100 | Sem |
| 12 | 0,5 | 200 | Sem |
| 13 | 0,75 | 50 | Com |
| 14 | 0,75 | 100 | Com |
| 15 | 0,75 | 200 | Com |
| 16 | 0,75 | 50 | Sem |
| 17 | 0,75 | 100 | Sem |
| 18 | 0,75 | 200 | Sem |
| 19 | 1,0 | 50 | Com |
| 20 | 1,0 | 100 | Com |
| 21 | 1,0 | 200 | Com |
| 22 | 1,0 | 50 | Sem |

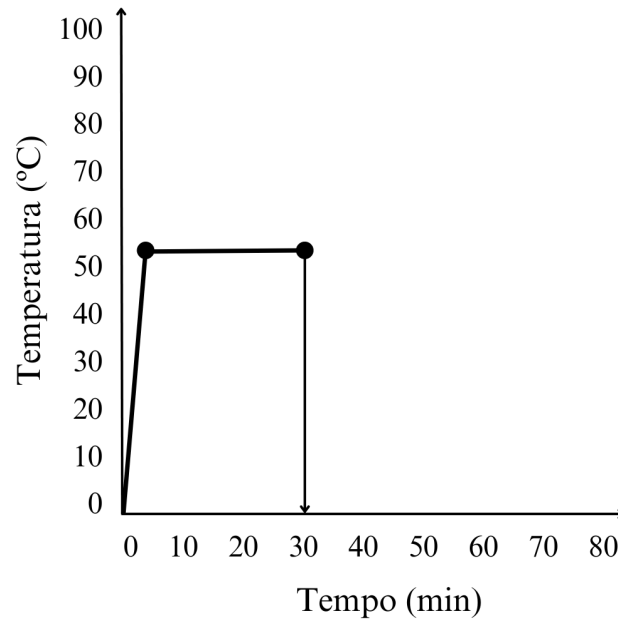
| Tabela 1: Condições experimentais | | | |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|
| 23 | 1,0 | 100 | Sem |
| 24 | 1,0 | 200 | Sem |
| 25 | 1,5 | 50 | Com |
| 26 | 1,5 | 100 | Com |
| 27 | 1,5 | 200 | Com |
| 28 | 1,5 | 50 | Sem |
| 29 | 1,5 | 100 | Sem |
| 30 | 1,5 | 200 | Sem |

Fonte: A Autora (2023)

Os experimentos foram conduzidos em triplicatas para cada uma das 30 combinações de concentração de enzima (0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5 g/L), agitação (50, 100, 200 rpm) e presença ou ausência de Berol®. Adicionalmente, foi incluída uma amostra sem tratamento para fins de comparação.

O processo ocorreu a uma temperatura constante de 55 °C, duração de 30 minutos, conforme Figura 6, em pH constante de 8,5 (Tampão Tris-HCl 0,05 M). Algumas amostras foram tratadas com a adição de Berol®, um surfactante não iônico à base de álcool etoxilado, enquanto outras foram tratadas sem Berol®. O objetivo era avaliar o efeito dessas variáveis no processo de biopurga e o efeito sobre as condições heterogêneas do sistema. A relação de banho foi mantida em 1:20, e todas as amostras foram submersas em uma solução tampão adequada.

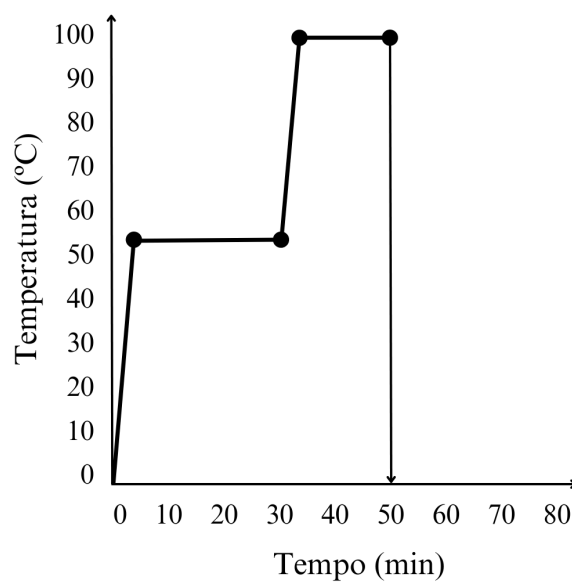
Figura 5: Perfil de aquecimento da Biopurga com pectinase BioPrep® 3000 L



Fonte: A Autora (2023)

Para interromper a atividade enzimática após o processo, todas as amostras foram submetidas a um tratamento de água a 100 °C. Esse tratamento foi realizado por um período de 10 minutos para garantir a completa inativação das enzimas.

Figura 6: Perfil de aquecimento da interrupção enzimática



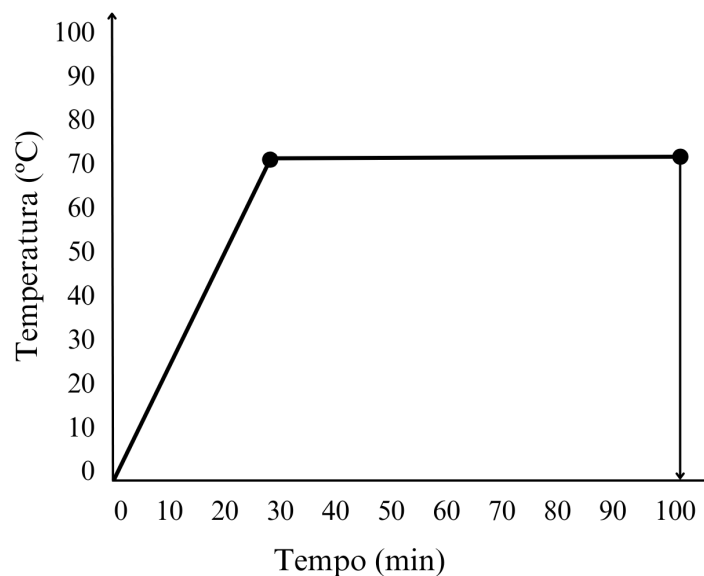
Fonte: A Autora (2023)

Em seguida, as amostras foram submetidas a uma etapa de lavagem para remover resíduos e produtos da reação enzimática. Essa lavagem foi realizada em banho-maria. As amostras foram imersas em um béquer contendo uma solução composta por água e 0,2 g/L de Berol®. A temperatura de lavagem foi mantida a 60 °C, e a duração do processo foi de 5 minutos. Após essa etapa, as amostras passaram por uma lavagem final com água corrente e foram, então, completamente secas em varal à sombra.

3.2.2 Determinação da pectina residual

A determinação da quantidade de pectina residual das amostras foi realizada por meio de uma máquina de tingimento. O processo ocorreu a uma temperatura de 70 °C e teve uma duração de 100 minutos, conforme Figura 8, com agitação constante a 50 RPM. A relação de banho foi de 1:50. Para quantificar a pectina removida, foi utilizado 0,6 mmol/L de azul de metileno. A absorbância das amostras foi analisada por meio do banho residual após o tingimento, em um espectrofotômetro ajustado para uma leitura em 663 nm.

Figura 7: Perfil de aquecimento para determinar a remoção de pectina



Fonte: A Autora (2023)

Utilizou-se a leitura do espectrofotômetro para avaliar a quantidade de pectina residual na amostra, sendo necessário diluir todas as soluções de azul de metileno em uma proporção de 1:10 para garantir uma leitura precisa no espectrofotômetro. Inicialmente, obteve-se a

concentração do azul de metileno puro, que representa o composto sem interação com a malha de algodão. A concentração de azul de metileno no banho sem tratamento foi medida no espectrofotômetro após o processo de tingimento. Isso possibilitou a determinação da pectina teórica residual com o auxílio da fórmula abaixo.

A fórmula simplificada para calcular a pectina residual teórica foi expressa como:

$$PRT = CMP - CST \quad (3)$$

Sendo *PRT* a pectina residual teórica, *CMP* a concentração do azul de metileno puro, e *CST* a concentração da amostra sem tratamento.

3.2.3 Curva de calibração

Inicialmente, foram preparadas soluções de azul de metileno em mmol/L em diferentes proporções, nomeadamente 1:10, 1:15, 1:20, 1:25, 1:30, 1:40 e 1:50. Estas soluções foram posteriormente submetidas à análise espectrofotométrica, permitindo a mensuração das suas absorvâncias.

Em seguida, procedeu-se à plotagem de um gráfico de dispersão, correlacionando as proporções de azul de metileno para solvente com as leituras de absorvância obtidas. A análise estatística desse conjunto de dados incluiu a aplicação de uma regressão linear, visando a obtenção da equação que descreve a curva de calibração.

A tabela a seguir apresenta as concentrações de Azul de Metileno utilizadas nos experimentos para determinar a curva de calibração:

Tabela 2: Concentrações do azul de metileno e absorvância lida a 663 nm

| Corante (mL) | Água (mL) | Abs (nm) | Conc. Cor. (mmol/L) |
|--------------|-----------|----------|---------------------|
| 1,0 | 9,0 | 0,9420 | 0,0600 |
| 0,63 | 9,33 | 0,6200 | 0,0375 |
| 0,50 | 9,50 | 0,5470 | 0,0300 |
| 0,40 | 9,60 | 0,4460 | 0,0240 |
| 0,34 | 9,66 | 0,3680 | 0,0204 |
| 0,25 | 9,75 | 0,2700 | 0,0150 |
| 0,20 | 9,80 | 0,2350 | 0,0120 |

Fonte: A Autora (2023)

3.2.4 Perda de massa

No processo experimental, as amostras de tecido foram submetidas à secagem em sílica antes da análise da perda de massa. Preparou-se o gel de sílica, assegurando que estivesse limpo e seco. Uma camada foi disposta no fundo de um recipiente, e sobre ela, posicionou-se o substrato têxtil. O recipiente foi então fechado hermeticamente. Deixou-se os substratos têxteis secarem por 48 horas. Após esse período, o substrato foi removido e armazenado em um local seco para evitar a absorção de umidade. Após isso, as amostras foram pesadas.

A porcentagem de perda de massa das amostras de tecido foi expressa como uma porcentagem em relação à massa inicial, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1} \right) * 100 \quad (4)$$

Onde m_1 e m_2 representam as massas do tecido antes e após o processo de limpeza, respectivamente.

Ao término do experimento, o desvio padrão foi calculado para avaliar a consistência e a variabilidade nos resultados obtidos a partir das diferentes amostras de tecido testadas.

3.2.5 Análise Estatística

Os tratamentos enzimáticos foram avaliados por meio de uma análise estatística de variância (ANOVA), considerando um nível de significância de 5%. A análise estatística foi conduzida utilizando o software Statistica® 12.

3.2.6 Análise da Difusividade por Meio do Modelo Cinético de Chrastil

Neste contexto, foi descrito os procedimentos para analisar e interpretar os resultados obtidos por meio do equacionamento no software Origin, visando a determinação da difusividade k . A resolução do modelo cinético de difusão, considerando $n = 1$ sob condições controladas, abrangeu:

- Baixa viscosidade do meio: Ambiente propício à difusão;
- Elevada temperatura (55°C): Favorecimento de reações de difusão eficientes;
- Ausência de resistência no meio à reação da camada limite: Minimização de fatores externos;
- Penetração superficial da enzima no substrato: Definição do alcance da interação enzimática.

Este enfoque metodológico foi influenciado pela abordagem adotada por Colombi *et al.* (2021), onde, em estudos com duração de cerca de 30 minutos, alcançou-se uma significativa remoção de pectina (80%) sob condições específicas de concentração de 1,5 g/L de enzima.

Adicionalmente, foram considerados três pontos temporais específicos nos gráficos: 0 minutos, representando a condição inicial em que nenhuma pectina foi removida; 30 minutos, que reflete os resultados de remoção de pectina para cada concentração com e sem Berol®; e 180 minutos, ponto teórico máximo discutido anteriormente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DAS AMOSTRAS

A análise das amostras submetidas ao processo enzimático de purga revelou resultados significativos em relação à perda de massa e ao grau de remoção de pectina. Esses parâmetros desempenham um papel crucial na avaliação da eficiência do processo.

Tabela 3: Comparação das propriedades físico-químicas das amostras de algodão

| Tratamento | [E] | Agitação (RPM) | Berol® | Perda de massa (%) |
|-------------------|------------|---------------------------|---------------|-------------------------------|
| 1 | 0,25 g/L | 50 | sim | 3,320 ± 0,002 |
| 2 | 0,25 g/L | 50 | - | 2,801 ± 0,005 |
| 3 | 0,25 g/L | 100 | sim | 4,002 ± 0,003 |
| 4 | 0,25 g/L | 100 | - | 3,780 ± 0,009 |
| 5 | 0,25 g/L | 200 | sim | 2,611 ± 0,003 |
| 6 | 0,25 g/L | 200 | - | 5,198 ± 0,047 |
| 7 | 0,50 g/L | 50 | sim | 3,062 ± 0,006 |
| 8 | 0,50 g/L | 50 | - | 1,975 ± 0,001 |
| 9 | 0,50 g/L | 100 | sim | 2,451 ± 0,003 |
| 10 | 0,50 g/L | 100 | - | 1,473 ± 0,009 |
| 11 | 0,50 g/L | 200 | sim | 5,080 ± 0,017 |
| 12 | 0,50 g/L | 200 | - | 4,679 ± 0,021 |
| 13 | 0,75 g/L | 50 | sim | 5,841 ± 0,029 |

Tabela 3: Comparação das propriedades físico-químicas das amostras de algodão

| | | | | |
|----|----------|-----|-----|-------------------|
| 14 | 0,75 g/L | 50 | - | $5,542 \pm 0,027$ |
| 15 | 0,75 g/L | 100 | sim | $4,670 \pm 0,005$ |
| 16 | 0,75 g/L | 100 | - | $4,117 \pm 0,003$ |
| 17 | 0,75 g/L | 200 | sim | $6,506 \pm 0,010$ |
| 18 | 0,75 g/L | 200 | - | $5,279 \pm 0,003$ |
| 19 | 1,0 g/L | 50 | sim | $6,565 \pm 0,033$ |
| 20 | 1,0 g/L | 50 | - | $3,900 \pm 0,016$ |
| 21 | 1,0 g/L | 100 | sim | $4,595 \pm 0,004$ |
| 22 | 1,0 g/L | 100 | - | $4,471 \pm 0,002$ |
| 23 | 1,0 g/L | 200 | sim | $4,593 \pm 0,002$ |
| 24 | 1,0 g/L | 200 | - | $3,050 \pm 0,013$ |
| 25 | 1,5 g/L | 50 | sim | $4,733 \pm 0,001$ |
| 26 | 1,5 g/L | 50 | - | $4,564 \pm 0,002$ |
| 27 | 1,5 g/L | 100 | sim | $6,026 \pm 0,018$ |
| 28 | 1,5 g/L | 100 | - | $4,977 \pm 0,024$ |
| 29 | 1,5 g/L | 200 | sim | $5,241 \pm 0,008$ |

Tabela 3: Comparação das propriedades físico-químicas das amostras de algodão

| | | | | |
|----|---------|-----|---|---------------|
| 30 | 1,5 g/L | 200 | - | 4,510 ± 0,017 |
| 31 | 0 | - | - | 0,64 |

31 é a amostra sem tratamento

Os valores são a média de três repetições ± desvio padrão

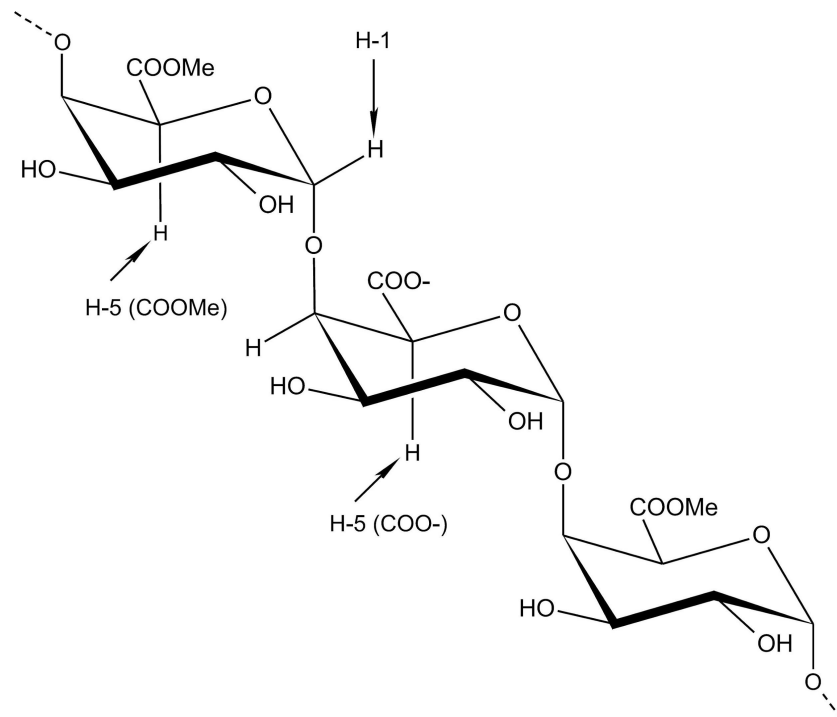
4.1.1 Grau de remoção de pectina

A eficácia do processo enzimático na quebra das ligações de pectina foi avaliada por meio do grau de remoção de pectina. Os resultados demonstraram um grau significativo de remoção de pectina, conforme destacado por Buchert *et al.* (2000), sendo essencial para melhorar a hidrofiliabilidade do tecido de algodão na indústria têxtil. A presença de pectina pode tornar o tecido menos receptivo a tratamentos subsequentes, como tingimento e acabamento, tornando, assim, um alto grau de remoção de pectina altamente desejável.

A análise da perda de massa e do grau de remoção de pectina destaca a importância desse processo na busca por práticas mais sustentáveis e eficientes no setor têxtil, conforme evidenciado por BuschleDiller *et al.* (1998), Hard *et al.*, (1997), e Csiszar *et al.*, (2001).

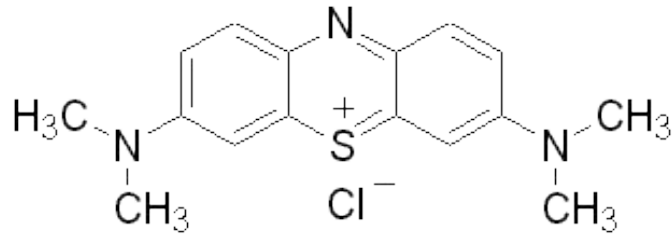
A composição da pectina, formada por unidades de ácido galacturônico ligadas entre si, destaca o potencial da interação com o Azul de Metileno, um corante catiônico. A interação estequiométrica entre o cátion do corante e o ânion do carboxilato na pectina, ilustrada nas Figuras 8 e 9, evidencia que quanto mais pectina está disponível, mais intensa é a coloração. (Canteri *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 1998).

Figura 8: Estrutura química da pectina



Fonte: (Sousa *et al.*, 2017)

Figura 9: Estrutura química do Azul de Metileno

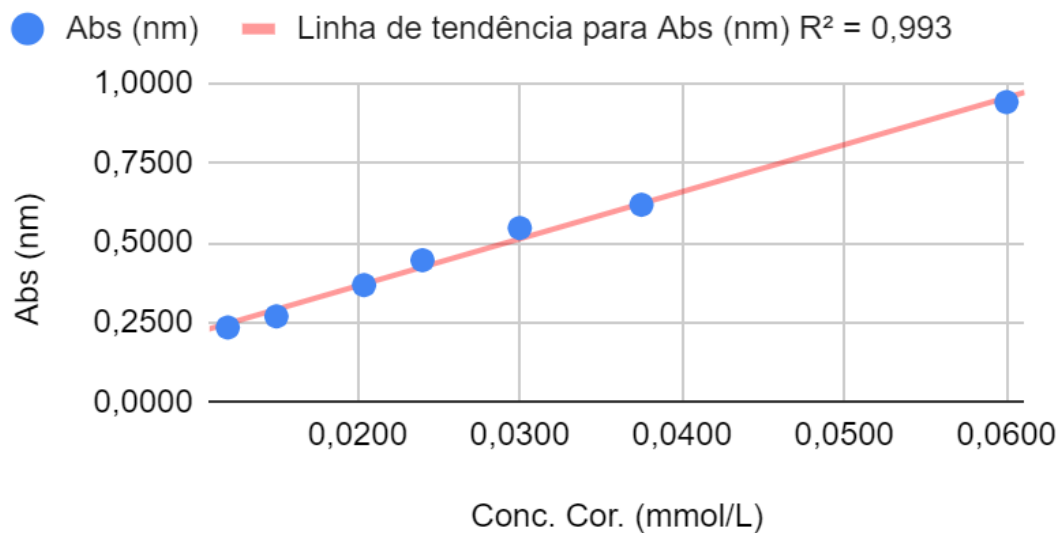


Fonte: (Silva *et al.*, 2018)

4.1.2 Curva de Calibração

Os parâmetros obtidos a partir desta curva oferecem informações fundamentais que validam a precisão e confiabilidade das análises realizadas. O coeficiente de determinação R^2 foi notável, atingindo 0,993 (99,30%). Este valor reflete um ajuste excepcionalmente preciso dos dados experimentais à linha de regressão. Desta forma, 99,30% da variação na resposta (absorbância) pode ser explicada pela variação na concentração do azul de metileno.

Figura 10: Curva de calibração do Azul de Metileno



Fonte: A Autora (2023)

4.1.3 Perda de massa

A alteração na estrutura do tecido de algodão, evidenciada pela diminuição de massa nas amostras, claramente indica a ação transformadora da enzima pectinase. Esse efeito é resultado da degradação da pectina que reveste as fibras de algodão.

Choe *et al.* (2004) destacaram a importância de uma pós-lavagem breve e em alta temperatura (≥ 80 °C) para a remoção eficaz das ceras do algodão. A perda de massa emerge como um parâmetro importante, sinalizando a eficácia do processo enzimático na eliminação da pectina. Quanto mais expressiva a perda de massa, mais eficiente é a atuação da enzima na quebra das ligações de pectina, tornando as fibras de algodão mais adequadas para as etapas subsequentes na indústria têxtil.

Notavelmente, as menores perdas de massa foram observadas nas amostras sem a presença de Berol®: 0,50 g/L com agitação de 100 RPM, apresentando 1,473% de perda, e 0,50 g/L com agitação de 50 RPM, com 1,975% de perda. No entanto, a concentração de 0,25 g/L exibiu resultados superiores à concentração de 0,50 g/L, possivelmente indicando uma otimização da atividade enzimática em uma faixa específica de concentração. Em contraste, os melhores resultados foram obtidos em duas amostras que utilizaram o Berol®: 0,75 g/L com agitação de 200 RPM, apresentando 6,506% de perda de massa, e 1,0 g/L com agitação de 50 RPM, com 6,656% de perda de massa.

Conforme ressaltado por Raza *et al.* (2014), surfactantes como o Berol® desempenham um papel semelhante a detergentes, atuando entre a água e as substâncias gordurosas imiscíveis na superfície das fibras. Esses agentes emulsionam compostos hidrofóbicos no meio aquoso, resultando na redução da massa e melhoria da branquidão nos tecidos produzidos. Essa observação reforça a importância do Berol® na otimização do processo enzimático, contribuindo para a eficácia na remoção de pectina e na melhoria das propriedades do tecido de algodão.

4.2 ANÁLISE DO TEOR DE PECTINA RESIDUAL

O processo de biopurga tem como seu maior objetivo a remoção das impurezas do algodão conferindo-lhe hidrofiliabilidade suficiente para que o tingimento seja bem sucedido. A pectina é o principal componente existente na cutícula, 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). Nesse sentido entende-se que a avaliação da pectina residual vem a ser o parâmetro mais importante a ser medido, o qual foi utilizado como resposta das análises estatísticas.

A Tabela 4 apresenta todos os valores obtidos nas análises que determinam o valor percentual de pectina removida em cada tratamento realizado, o qual seguiu uma metodologia multifatorial considerando fatores independentes agitação (3 níveis), concentração de enzima (5 níveis) e tensoativo (Berol® 1 g/L e 0 g/L).

Tabela 4: Resultado das análises de pectina residual das amostras de malha de algodão nos tratamentos enzimáticos com variação de concentração de enzima, agitação e presença de tensoativo.

| Concentração de enzima g/L | Agitação (RPM) | Berol® | Média Pectina residual (%) | Desvio padrão |
|----------------------------|----------------|--------|----------------------------|---------------|
| 0,25 | 50 | com | 23,990 | 1,059 |
| 0,25 | 50 | sem | 16,780 | 3,405 |
| 0,25 | 100 | com | 34,250 | 1,520 |
| 0,25 | 100 | sem | 29,500 | 2,493 |
| 0,25 | 200 | com | 31,700 | 0,486 |
| 0,25 | 200 | sem | 24,260 | 5,624 |
| 0,5 | 100 | com | 50,350 | 4,925 |
| 0,5 | 200 | sem | 44,410 | 1,763 |
| 0,75 | 100 | com | 31,000 | 2,888 |
| 0,75 | 100 | sem | 16,280 | 1,368 |
| 0,75 | 200 | com | 18,420 | 2,493 |
| 0,75 | 200 | sem | 32,880 | 1,125 |
| 1 | 50 | com | 22,800 | 4,438 |
| 1 | 50 | sem | 15,910 | 2,219 |
| 1 | 100 | com | 19,750 | 1,125 |
| 1 | 100 | sem | 18,420 | 2,493 |
| 1 | 200 | com | 32,870 | 1,125 |
| 1 | 200 | sem | 27,730 | 1,155 |
| 1,5 | 50 | com | 43,910 | 2,371 |
| 1,5 | 50 | sem | 26,490 | 2,493 |
| 1,5 | 100 | com | 40,130 | 5,046 |
| 1,5 | 100 | sem | 28,040 | 1,915 |

Tabela 4: Resultado das análises de pectina residual das amostras de malha de algodão nos tratamentos enzimáticos com variação de concentração de enzima, agitação e presença de tensoativo.

| | | | | |
|-----|-----|-----|--------|-------|
| 1,5 | 200 | com | 22,250 | 1,338 |
| 1,5 | 200 | sem | 16,140 | 1,642 |

Fonte: A Autora (2023)

Observando os valores dos desvios padrão dos tratamentos vê-se que há uma variação que pode ser explicada pela imprecisão do método de determinação de pectina. A interação entre o corante azul de metileno, um corante do tipo básico, é do tipo eletrostática que pode ser influenciada por condições do meio. Entretanto a possível maior componente de variação pode estar relacionada ao fato de o corante estar absorvido ou adsorvido nos interstícios das fibras de algodão ou entre os ligamentos de malha, cuja quantidade não pode ser mensurada e pode estar interferindo na variância dos valores de pectina residual.

A análise estatística realizada por meio de análise de variância ANOVA com 5 % de significância demonstra que tanto os fatores isolados como as interações entre eles são significativas. Esse resultado mostra que quando o sistema enzimático é heterogêneo além da concentração de enzima, o uso de tensoativos e a agitação deve receber atenção especial para que o processo seja maximizado e a umectância esperada seja atingida.

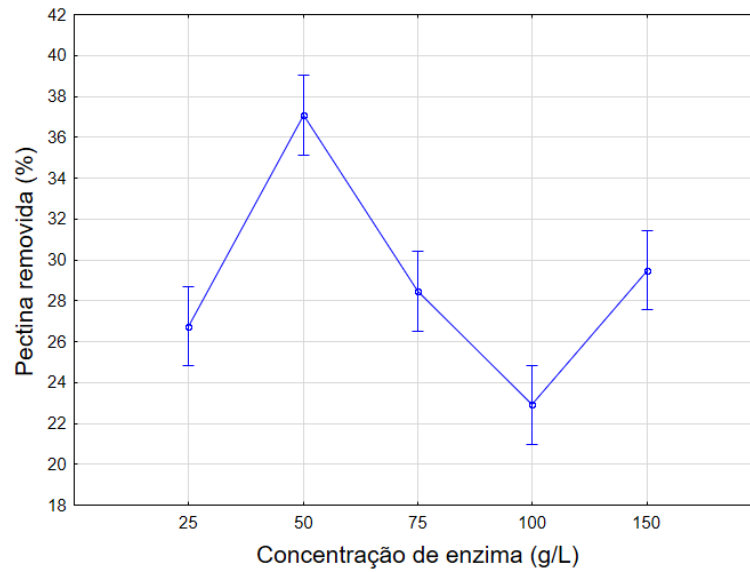
Figura 11: ANOVA para pectina residual em algodão biopurgado.

| Effect | SS | Degr. of Freedom | MS | F | p |
|--|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Intercept | 75395,92 | 1 | 75395,92 | 4475,963 | 0,000000 |
| Concentração de enzima | 1941,50 | 4 | 485,37 | 28,815 | 0,000000 |
| Agitação | 379,57 | 2 | 189,79 | 11,267 | 0,000070 |
| tensoativo | 1242,01 | 1 | 1242,01 | 73,733 | 0,000000 |
| Concentração de enzima*Agitação | 5041,63 | 8 | 630,20 | 37,413 | 0,000000 |
| Concentração de enzima*tensoativo | 229,78 | 4 | 57,45 | 3,410 | 0,014048 |
| Agitação*tensoativo | 237,56 | 2 | 118,78 | 7,052 | 0,001776 |
| Concentração de enzima*Agitação*tensoativo | 715,43 | 8 | 89,43 | 5,309 | 0,000047 |

Fonte: A Autora (2023)

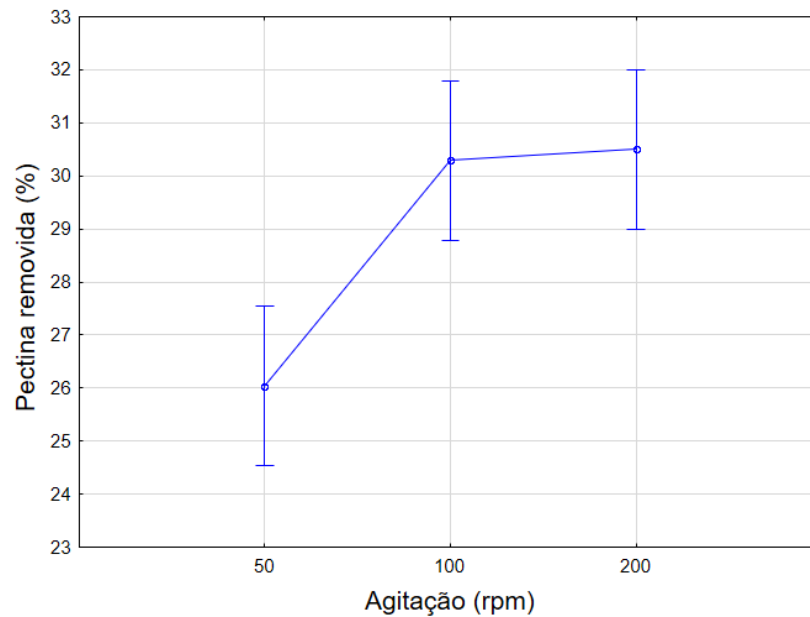
As Figuras 12, 13 e 14 apresentam o comportamento de cada fator, concentração de enzima, agitação e presença de tensoativo, para a remoção de pectina em processo de biopurga com pectinase. As barras nos gráficos denotam o intervalo com 95% de confiança.

Figura 12: Efeito da concentração de enzima sobre o conteúdo de pectina residual em algodão biopurgado.



O comportamento da concentração de enzima pectinase para o processo identificou que a concentração de 0,5 atingiu índices médios mais elevados de remoção de pectina, contrariando uma tendência de que quanto mais alta a concentração de enzima melhor seria para a remoção. O estudo conduzido por Colombi e colaboradores (2021) utilizando 1,0 g/L da mesma enzima Bio Prep utilizada neste trabalho, teve resultados muito superiores atingindo níveis de remoção de pectina na ordem de 3 % de pectina residual. Resultados diferentes estão relacionados às condições de processos e tipo de equipamento utilizado. O estudo aqui apresentado foi realizado em shaker, cuja movimentação da malha é muito inferior à que ocorre num equipamento de tingimento laboratorial, utilizado no estudo de Colombi *et al.* (2021).

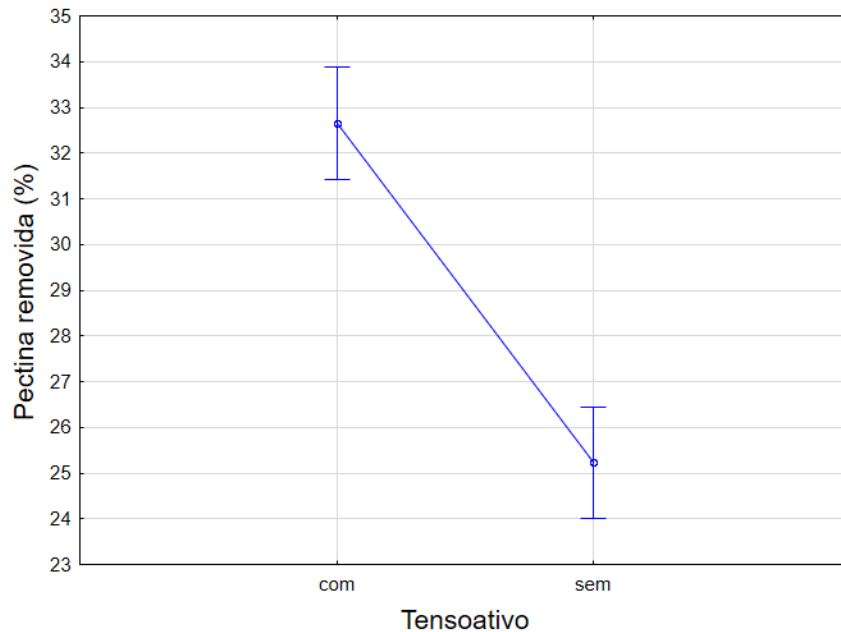
Figura 13: Efeito da agitação sobre o conteúdo de pectina residual em algodão biopurgado.



Fonte: A Autora (2023)

A condição de agitação interfere na probabilidade de encontro entre a enzima e o substrato, sendo que se observa que com uma agitação orbital que ocorre em “shaker” a máxima remoção de pectina se deu à 100 rpm. Em 200 rpm a malha já se agitava no mesmo sentido da rotação do banho, implicando em menor turbulência. Cabe ressaltar que esse resultado é válido para o sistema de agitação utilizado neste trabalho e estudos semelhantes devem ser realizados para sistemas com outras formas de agitação. A importância da agitação em sistemas heterogêneos está relacionado à melhoria da homogeneização do sistema, garantindo condições mais uniformes ao longo do sistema, ao dispersão de produtos da superfície que podem interferir na atuação da enzima, reduz gradientes de concentração e evita limitações difusionais e aumenta a probabilidade de interações entre os sítios ativos das enzimas e a pectina da superfície das fibras de algodão.

Figura 14: Efeito do tensoativo sobre o conteúdo de pectina residual em algodão biopurgado.



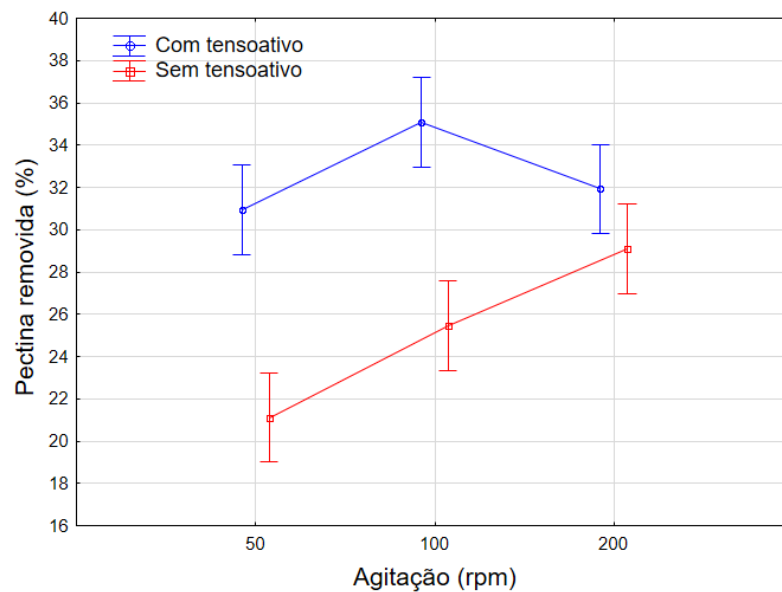
Fonte: A Autora (2023)

Em relação a ação do tensoativo, verifica-se que a condição de biopurga é favorecida com a sua presença. O tensoativo atua diminuindo a tensão superficial do substrato e redução da resistência na aproximação da enzima à superfície da malha. Segundo a ficha técnica, o Berol® tem ação umectante e dispersante. A melhora na dispersibilidade da enzima, uma molécula com alto peso molecular, favorece uma atuação mais homogênea na superfície da malha com conseqüente otimização da remoção da pectina. Estudos anteriores realizados pelo grupo demonstraram que o Berol® é adverso para a atividade enzimática (Colombi *et al.*, 2022), entretanto, em outro estudo realizado por Colombi *et al.* (2021) verificou-se que sua presença é mais favorável para a remoção de pectina que a sua ausência, e ainda os autores corroboram essa informação dada a relação dos tensoativos com a remoção de óleos e graxas presentes na fibra, cuja remoção é fundamental para o ganho de hidrofiliabilidade da malha de algodão.

Quando se observa as condições de agitação e presença de tensoativo, como mostra a Figura 15, verifica-se como a interação significativa desses fatores se dá. Sem a presença do tensoativo a crescente agitação é interessante para a atuação da enzima, enquanto que a presença do tensoativo diminui a necessidade de maiores velocidades de agitação. Pode estar havendo uma compensação dos fenômenos de superfície proporcionados pela presença de

tensoativo no meio reacional. Em todas as condições a presença do tensoativo favoreceu a remoção de pectina, não havendo implicações na atuação da enzima, mesmo podendo ocorrer um desfavorecimento à atividade enzimática da pectinase. Assim verifica-se que é mais interessante a adição do surfactante não iônico aqui testado, inclusive com um indicativo de possibilidade de redução de consumo energético pela redução da necessidade de agitação do sistema e, conseqüente possibilidade de redução de tamanho de motores envolvidos na movimentação do meio.

Figura 15: Interação entre os fatores agitação e tensoativos do sistema de biopurga de algodão com pectinase.



Fonte: A Autora (2023)

A variação de fatores de processo que contribuem para a redução da resistência do acesso da enzima ao substrato em condições heterogêneas justificam a verificação do ajuste do modelo de Chrastil para sistemas de biopurga de malha de algodão.

4.3 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE DIFUSIVIDADE E VERIFICAÇÃO DE AJUSTE AO MODELO CINÉTICO PROPOSTO POR CHRASTIL

Ao longo deste tópico, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, destacando a relevância da difusividade no contexto da cinética de difusão e as implicações práticas dessas descobertas. Das 91 amostras analisadas, foram escolhidas representativas para comparação, visto que os resultados obtidos demonstraram consistência.

A cada concentração, associou-se um coeficiente de difusividade k . Esses valores, cruciais para a compreensão do fenômeno em estudo, estão detalhados na Tabela 5, apresentada a seguir.

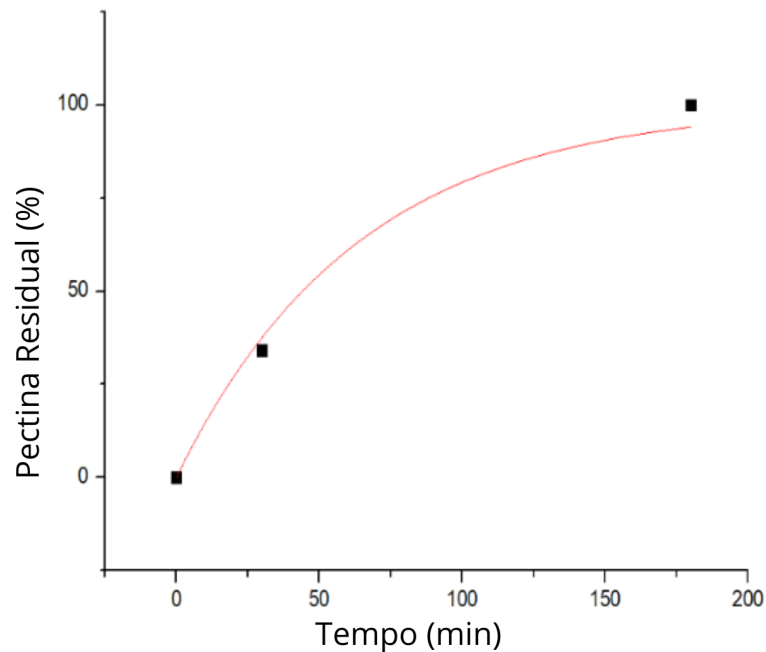
Tabela 5: Estudo da difusividade do azul de metileno sob variações de concentração e agitação (RPM)

| Concentração (g/L) | Berol® | Agitação (RPM) | Difusividade (k) |
|--------------------|--------|----------------|------------------|
| 0,25 | Com | 100 | 0,06285 |
| 0,25 | Sem | 100 | 0,05714 |
| 0,50 | Com | 100 | 0,04701 |
| 0,50 | Sem | 100 | 0,03206 |
| 0,75 | Com | 100 | 0,01961 |
| 0,75 | Sem | 100 | 0,01545 |
| 1,00 | Com | 100 | 0,01523 |
| 1,00 | Sem | 100 | 0,01193 |
| 1,50 | Com | 100 | 0,01199 |
| 1,50 | Sem | 100 | 0,00928 |
| 1,00 | Com | 200 | 0,01527 |
| 1,00 | Sem | 200 | 0,01383 |
| 1,00 | Com | 50 | 0,01274 |
| 1,00 | Sem | 50 | 0,01153 |

Fonte: A Autora (2023)

A análise conduzida pelo programa Origin desempenhou um papel importante na interpretação dos dados, possibilitando uma análise detalhada dos parâmetros estudados.

Figura 16: Ajuste do modelo de Chrastil das amostras 0,25 g/L, com Berol® e 100 RPM



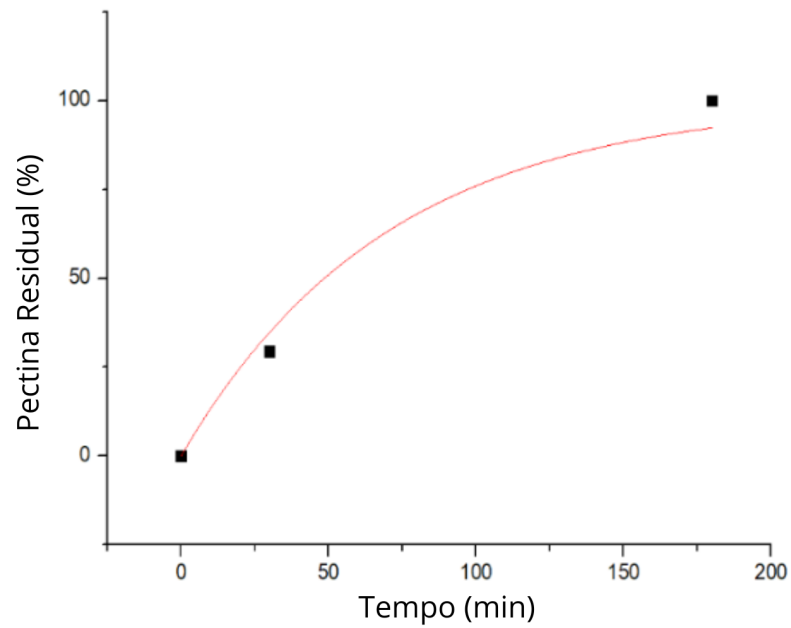
Fonte: A Autora (2023)

Os resultados revelaram um coeficiente de determinação R^2 notável de 0,99107, indicando uma excelente concordância entre os dados experimentais e o modelo teórico empregado.

Em uma análise comparativa entre dois conjuntos de condições experimentais, ambos conduzidos com uma concentração de enzima de 0,25 g/L e agitação a 100 RPM, mas diferindo na presença de Berol® durante o tratamento enzimático.

A análise dos resultados revela uma diferença sutil na difusividade entre as condições, indicando que a presença de Berol® pode ter influenciado positivamente a eficácia do processo de difusão. Embora ambas as condições apresentem uma excelente concordância entre os dados experimentais e os modelos teóricos, a condição com Berol® demonstra uma difusividade ligeiramente superior.

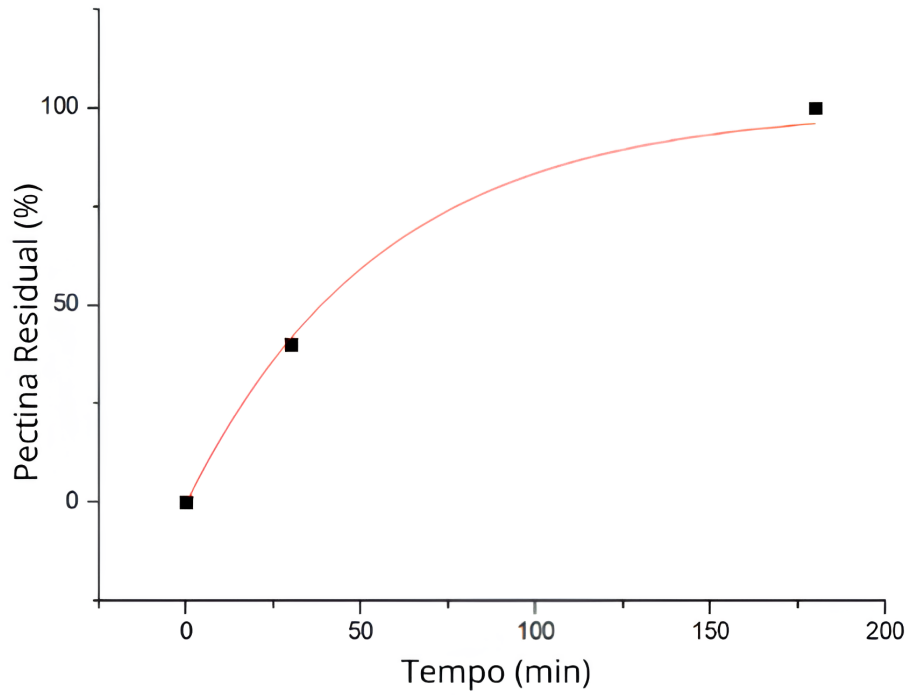
Figura 17: Ajuste do modelo de Chrastil das amostras 0,25 g/L, sem Berol® e 100 RPM



Fonte: A Autora (2023)

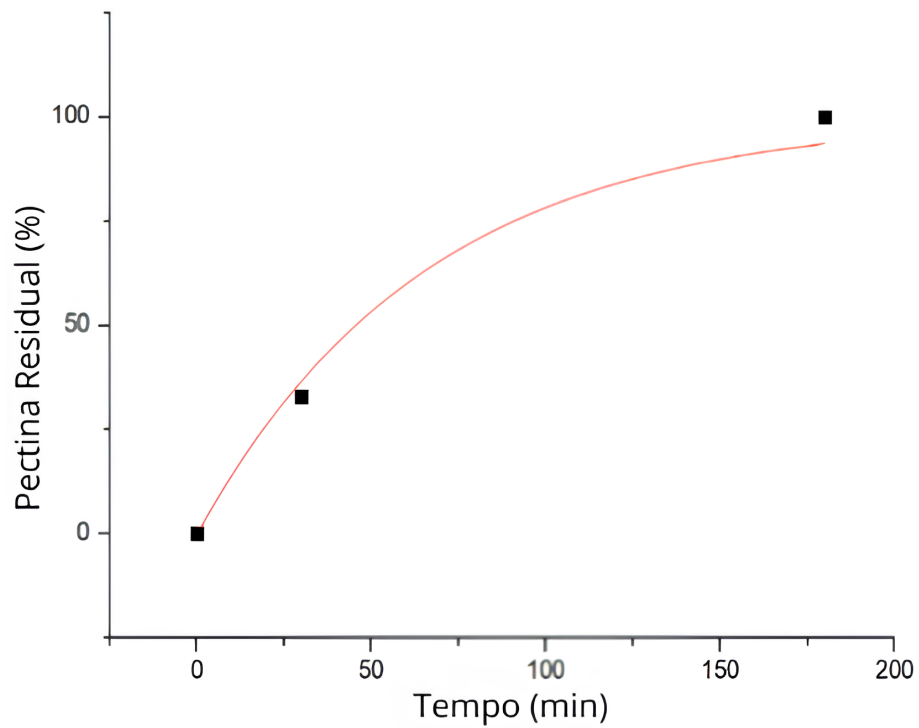
A ausência do surfactante Berol® pode ter introduzido variações na interação entre a enzima e o substrato, impactando diretamente a eficácia do tratamento enzimático. É perceptível que ao longo de todo o processo, tanto com quanto sem Berol®, uma consistência é evidente, como pode ser observado nas análises a seguir.

Figura 18: Ajuste do modelo de Chrastil das amostras 1,5 g/L, com Berol® e 100 RPM



Fonte: A Autora (2023)

Figura 19: Ajuste do modelo de Chrastil das amostras 1,5 g/L, sem Berol® e 100 RPM

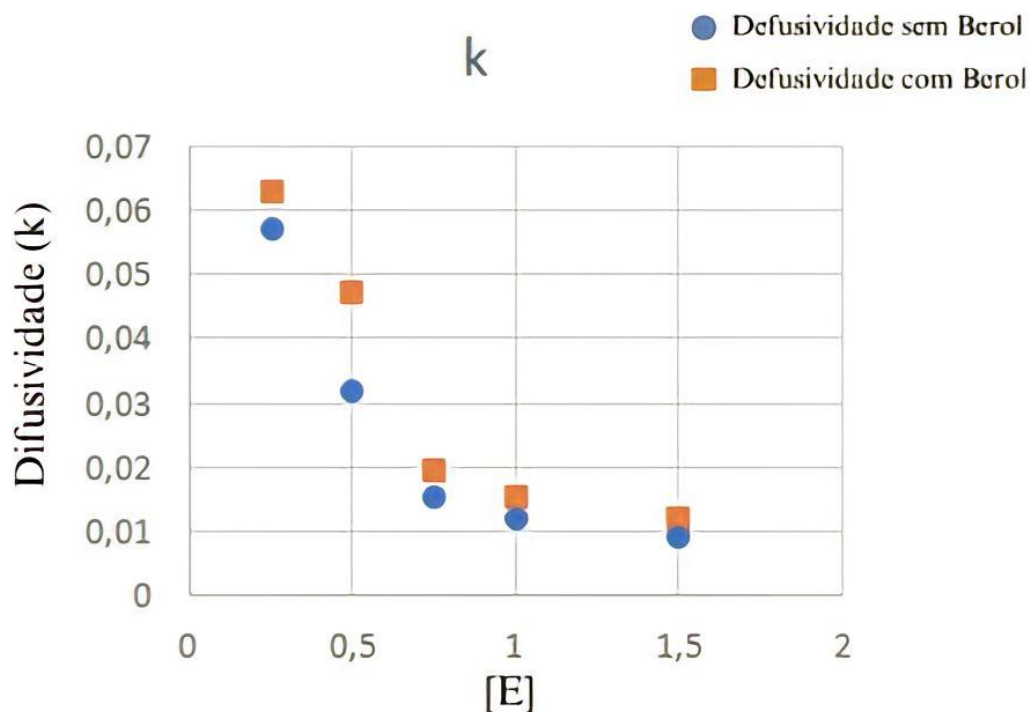


Fonte: A Autora (2023)

Nas Figuras 18 e 19, ambos foram realizados a 100 RPM, porém divergindo na presença de Berol® durante o processo de tratamento enzimático.

Os resultados indicam que, mesmo com a mesma concentração de enzima (1,5 g/L), a presença de Berol® continua a demonstrar uma influência positiva na difusividade, como evidenciado pelo coeficiente de determinação mais elevado ($R^2 = 0,99647$). A condição sem Berol®, apesar de apresentar uma difusividade ligeiramente inferior, ainda exibe uma excelente concordância entre os dados experimentais e o modelo teórico ($R^2 = 0,98922$).

Figura 20: Comparação de dados de difusividade com e sem Berol®, 100 RPM



Fonte: A Autora (2023)

Denotado pela coloração laranja, torna-se evidente que, em todas as concentrações, os resultados obtidos na presença de Berol® demonstraram ser mais satisfatórios para a remoção da pectina pela pectinase. Este efeito positivo sugere uma sinergia entre o surfactante e a enzima, otimizando a eficácia do processo.

Tensoativos reduzem as tensões interfaciais entre fases diferentes, facilitando a interação entre as enzimas que se encontra dispersa no meio líquido e pectina que está imobilizada na cutícula da fibra de algodão, e, permitindo uma melhor difusão da enzima para a superfície do substrato têxtil. Rubingh (1996) explica que a relação entre enzima e

tensoativo é diferente para cada enzima, podendo favorecer ou não a atuação da enzima sobre a reação com o substrato.

No estudo conduzido por Colombi *et al.* (2022), foi observado que a presença de tensoativos é mais benéfica do que prejudicial para o processo de biopurga. Isso se deve ao fato de que o processo envolve não apenas a atividade enzimática, mas também a transferência de massa e a remoção de componentes graxos presentes na fibra, sejam naturais ou adicionados durante a fiação. É importante destacar que este estudo não abordou a análise da diminuição em concentrações subsequentes.

É interessante notar que as concentrações de 0,75 e 1 apresentam taxas de remoção mais moderadas. Isso sugere que, além de um certo ponto, a adição de Berol® pode não resultar em aumentos proporcionais na eficácia do processo.

Em concentrações menores (0,25 e 0,5), a presença de Berol® resulta em aumentos substanciais na taxa de remoção. No entanto, à medida que a concentração de enzima aumenta, a diferença nas taxas de remoção entre as condições com e sem Berol® diminui. Isso sugere que, em concentrações mais elevadas, a eficácia do processo pode ser mantida com o uso de uma concentração mais baixa de enzima, o que é vantajoso para a economia de recurso.

Contudo, nota-se que, a partir de uma concentração específica, a melhoria proporcionada pelo Berol® parece atenuar-se. A concentração de 1,5, embora numericamente superior à de 1 em [E], apresenta um aumento menor na remoção com Berol® em comparação com concentrações inferiores. Este padrão sugere a possibilidade de uma saturação ou atenuação do efeito benéfico do Berol® à medida que a concentração de enzima aumenta.

Ao comparar as concentrações de 0,25 e 0,5, observa-se um aumento significativo na taxa de remoção com a presença de Berol®.

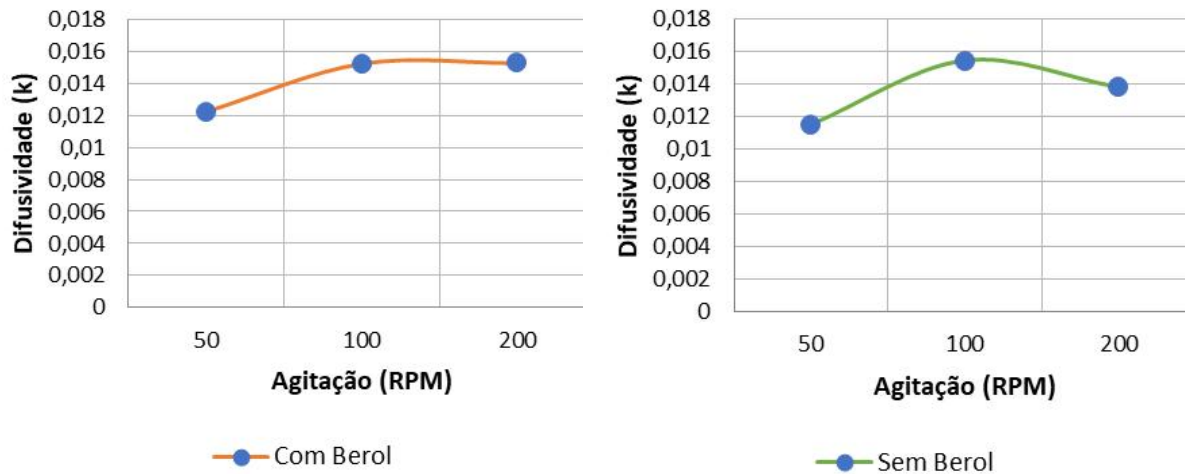
As concentrações de enzima foram mantidas constantes em 1,0 g/L para ambas as condições, permitindo uma análise direta dos efeitos da agitação na taxa de remoção de pectina no tecido.

Observa-se uma variação nas taxas de remoção, indicando uma sensibilidade significativa à agitação. À medida que os RPM aumentam de 50 para 200, a taxa de remoção cresce de 22,80% para 32,88%. Este comportamento é corroborado pelas constantes de taxa (k), que também apresentam um leve aumento de 0,01224 a 0,01527.

Na ausência de Berol®, revelam-se padrões semelhantes. A agitação continua a impactar positivamente as taxas de remoção, evidenciado pelo aumento da taxa de 15,90% a

27,70% conforme os RPM aumentam de 50 para 200. As constantes de taxa (k) variam de 0,01153 a 0,01545, exibindo uma tendência análoga à condição com Berol®.

Figura 21: Comparação de difusividade com e sem Berol® sob diferentes níveis de agitação.



Fonte: A Autora (2023)

Analisando o gráfico sob uma perspectiva alternativa, representado pela Figura 21, torna-se evidente que o aumento na agitação exerce uma influência positiva nas taxas de remoção quando o meio contém Berol®. Em contrapartida, observa-se um padrão inverso quando o Berol® não está presente, resultando em uma redução no rendimento do processo.

Essa observação destaca a importância da agitação como um fator crítico no desempenho do processo enzimático, com Berol® atuando como um coadjuvante benéfico nesse contexto. A presença do surfactante parece potencializar os efeitos positivos da agitação, enquanto sua ausência pode limitar a eficiência do processo.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo investigar a eficiência do processo enzimático de purga em amostras de tecido de algodão 100% cru, com foco especial na remoção de pectina, um componente crucial na fibra do algodão. Inicialmente, a pesquisa estabeleceu uma base sólida, abordando aspectos teóricos relacionados à morfologia do algodão, sua composição química, e a presença significativa da pectina nesse contexto.

Ao longo da pesquisa, foram explorados os processos de purga convencional e enzimática, destacando a aplicação da enzima pectinase como uma alternativa para a remoção eficiente de pectina. O objetivo final era tornar o tecido de algodão mais adequado para processos subsequentes na indústria têxtil.

Os resultados obtidos na análise das amostras revelaram a eficácia do processo enzimático na remoção da pectina, evidenciada pela perda de massa e pelo grau de remoção alcançado. A equação desses resultados proporcionou uma compreensão mais aprofundada dos efeitos do processo enzimático nas amostras de tecido de algodão.

A análise comparativa destacou a importância crítica da agitação, influenciando positivamente as taxas de remoção tanto na presença quanto na ausência de Berol®. No entanto, observou-se uma dinâmica intrigante ao analisar concentrações mais elevadas de enzima, onde os resultados podem não ser tão satisfatórios. Em concentrações mais altas, o aumento na agitação pode não se traduzir proporcionalmente em benefícios adicionais, levantando considerações sobre a eficiência do processo em termos de custo-benefício.

A presença do Berol® emergiu como um facilitador essencial do processo enzimático, contribuindo para a otimização da eficiência global. No entanto, é fundamental exercer cautela ao considerar concentrações mais altas, onde os ganhos adicionais podem não justificar o aumento nos custos operacionais.

Em última análise, as conclusões deste trabalho sublinham a relevância da análise matemática e cinética no estudo da remoção de pectina, bem como destacam a importância de pesquisas futuras para explorar ainda mais os benefícios do processo enzimático na indústria têxtil. Essas descobertas fornecem uma base sólida para avanços futuros e contribuem para o entendimento aprofundado das nuances envolvidas no processo enzimático de purga em tecidos de algodão cru.

Os resultados abrangentes corroboram descobertas de estudos anteriores, sublinhando o potencial e as vantagens da biopurga sobre a purga alcalina no que diz respeito às

propriedades físico-químicas predominantes dos tecidos. Para além das contribuições científicas recentes, este estudo reforça a posição da biopurga como uma escolha sustentável, viável e promissora para atender às demandas da indústria têxtil. Diante das preocupações ambientais associadas à lavagem alcalina, os bioprocessos emergem como soluções ecologicamente corretas, aptas a serem implementadas com sucesso em contextos industriais. Enquanto a purga química convencional levanta inquietações ambientais, a biopurga destaca-se como uma alternativa mais amigável, oferecendo uma abordagem eficaz e sustentável para satisfazer as exigências da indústria têxtil contemporânea.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M.; CASTRO, E. M. M.. **Manual de Engenharia Têxtil**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.

ARAÚJO, Massilon J. et al. **FUNDAMENTOS DE AGRONEGÓCIOS**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2007. 157 p.

ARBIGE, Michael V. et al. Industrial Enzymology: the next chapter. **Trends In Biotechnology**, [S.L.], v. 37, n. 12, p. 1355-1366, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.09.010>.

ALY, A.S; MOUSTAFA, A.B; A HEBEISH,. Bio-technological treatment of cellulosic textiles. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 12, n. 7, p. 697-705, set. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0959-6526\(03\)00074-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0959-6526(03)00074-x).

AGGARWAL, Ruchika *et al.* Extraction of pectinase from *Candida* isolated from textile mill effluent and its application in bio-scouring of cotton. **Sustainable Chemistry And Pharmacy**, [S.L.], v. 17, p. 100291, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2020.100291>.

AGRAWAL, P. **The Performance of Cutinase and Pectinase in Cotton Scouring**. [s.l.] University of Twente, 2005.

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.

AKIL, H. M., OMAR, M. F., MAZUKI, A. A. M., SAFIEE, S., ISHAK, Z. A. M., & ABU BAKAR, A. (2011). Kenaf fiber reinforced composites: A review. **Materials and Design**, v. 32, p. 4107–4121.

BAILEY, C. J. **Biochemical journal**. v. 262, p. 1001–1002, 1989.

BASTO, C.; TZANOV, T.; PAULO, A. M. C. **Combined ultrasound-laccase assisted bleaching of cotton**. *Ultrasonics Sonochemistry*, Amsterdam, v. 14, n. 3, p.350-354, march, 2007.

BESEGATTO, S. V. et al. Enzyme Treatment at Different Stages of Textile Processing: A Review. *Industrial Biotechnology*, v. 14, n. 6, p. 298–307, 2018.

B. L. COLOMBI, R. C. S. C. VALLE; J. A. B. VALLE, J. A. Advances in sustainable enzymatic scouring of cotton textiles : Evaluation of different post-treatments to improve fabric wettability. *Cleaner Engineering and Technology*, v. 4, p. 100160, 2021.

BUAINAIN, Antônio Márcio *et al.* **Cadeia Produtiva do Algodão Cadeia Produtiva do Algodão**. 4. ed. Brasília: Gráfica e Editora Qualidade, 2007. 110 p

BUCHERT, J., et al. “**Scouring of cotton with pectinases, proteases and lipases**”. *Textile Chemist and Colorist & American Dyestuff Reporter*, p. 48-52, 2000.

BUSCHLE-DILLER, et al. **Influence of direct and reactive dyes on The enzymatic hydrolysis of cotton**. *Text. Res.*, v. 68, p.185–192, 1998.

CALADO, V. M. M. et al. **Produção de Celulases por Linhagens de Humicola grisea sob Cultivo Submerso**. *Revista Ciências & Tecnologia*, S. L., v. 1, p.1-6, 2007.

CALAFELL, M.; GARRIGA, P. Effect of some process parameters in the enzymatic scouring of cotton using an acid pectinase. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 34, n. 3–4, p. 326–331, 2004.

CANTERI, Maria H. G. *et al.* **Pectina: da matéria-prima ao produto final**. *Polímeros*, [S.L.], v. 22, n. 2, p. 149-157, 10 abr. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282012005000024>.

CAVACO-PAULO, A. *et al.* **Textile processing with enzymes**. Boca Raton: Crc Press, 2003. 240 p.

CARRILLO, F. et al. **Effect of alkali pretreatment on cellulase hydrolysis of wheat straw: Kinetic study.** *Process Biochemistry*, v. 40, n. 10, p. 3360–3364, 2005.

CHAKRABORTY, J. N.; MADHU, A. **Developments in application of enzymes for textile processing.** *Journal Cleaner Production* 145:114-133, 2017.

CHOE, E. K.; NAM, C. W.; KOOK, S. R.; CHUNG, C.; CAVACO-PAULO, A. Implementation of batchwise bioscouring of cotton knits. **Biocatalysis and Biotransformation**, v. 22, n. 5–6, p. 375–382, 2004.

CHRASIL, Joseph. **Enzymic product formation curves with the normal or diffusion limited reaction mechanism and in the presence of substrate receptors.** *International Journal Of Biochemistry*, [S.L.], v. 20, n. 7, p. 683-693, jan. 1988. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0020-711x\(88\)90163-2](http://dx.doi.org/10.1016/0020-711x(88)90163-2).

CHRASIL J, WILSON JT. **The effect of chemical and physiological factors on the kinetics for product formation as it relates to enzyme activity and concentration, reaction time and to substrate adsorption and affinity.** *Int J Biochem* 1982;14:1–17.

COLOMBI, B. L. et al. Understanding the effects of process parameters in the bioscouring of cotton and their interactions on pectate lyase activity by factorial design analysis. **Journal of the Textile Institute**, v. 113, n. 5, p. 857–868, 2022.

COSTA, Valentim Emilio Uberti; AMORIM, Hermes Luís Neubauer de. O emprego de lipases como agentes de resolução cinética de enantiômeros em síntese orgânica: aspectos gerais sobre a influência do solvente. **Química Nova**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 863-873, dez. 1999. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40421999000600014>.

CSISZAR, E., et al. **Enzymes and chelating agent in cotton pretreatment.** *Journal of Biotechnology*. v. 89, p. 271–279, 2001.

DAO, T. A. T.; WEBB, H. K.; MALHERBE, F. Optimization of pectin extraction from fruit peels by response surface method: Conventional versus microwave-assisted heating. **Food Hydrocolloids**, v. 113, p. 106475, 2021.

EICHHORN, S. et al. (Ed.). **Handbook of textile fiber structure: Volume 2: Natural, regenerated, inorganic and specialist fibres.** 2009

EINSCHLAG, F. S. G.. **Waste Water: Treatment and Reutilization.** S. L.: Intech, 2011. Cap. 20, p. 387-404.

ETTERS, J. N. Cotton preparation with alkaline pectinase: An environmental advance. **Textile Chemist and Colorist and American Dyestuff Reporter**, v. 1, n. 3, p. 33–36, 1999.

FAN, L. T.; LEE, Yong-Hyun. Kinetic studies of enzymatic hydrolysis of insoluble cellulose: derivation of a mechanistic kinetic model. **Biotechnology And Bioengineering**, [S.L.], v. 25, n. 11, p. 2707-2733, nov. 1983. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260251115>.

FURLAN, F. R. **Caracterização e Aplicação de Enzimas de Forma Combinada na Biopreparação de Tecidos Felpudos de Algodão.** Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

GAN, Q; ALLEN, S.J; TAYLOR, G. Kinetic dynamics in heterogeneous enzymatic hydrolysis of cellulose: an overview, an experimental study and mathematical modelling. **Process Biochemistry**, [S.L.], v. 38, n. 7, p. 1003-1018, fev. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0032-9592\(02\)00220-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0032-9592(02)00220-0).

GUIMARAES, Nelciele Cavalieri de Alencar *et al.* Bioprocess and biotechnology: effect of xylanase from *aspergillus niger* and *aspergillus flavus* on pulp biobleaching and enzyme production using agroindustrial residues as substrate. **Springerplus**, [S.L.], v. 2, n. 1, 13 ago. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/2193-1801-2-380>.

GUMMADI, S. N. et al. **Purification and biochemical properties of microbial pectinase: A Review.** *Process Biochemistry*, S. L., v. 38, n. 7, p.987-996, 28 Feb. 2003.

GUO, C. et al. Enzymatic treatment on cotton fibers: degradation kinetics of pectin and influence of shape change on adsorption. **Fibers and Polymers**, v. 18, n. 10, p. 1882–1890, 2017.

HARDIN, I.R.. Enzymatic treatment versus conventional chemical processing of cotton. **Advances In Textile Biotechnology**, [S.L.], p. 132-149, 2010. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857090232.2.132>.

HARDIN, et al. **Enzymatic scouring of cotton: effects on structure and properties. Textile Chemist and Colorist**. v. 8, p. 71-76, 1997.

KALANTZI, S. et al. **Improved Properties of Cotton Fabrics Treated with Lipase and its Combination with Pectinase**. *Fibres & Textiles: in Eastern Europe*, S. L., v. 18, n. 5, p.86-92, 2010.

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

LEÃO,M.M.D et al. **Controle ambiental na indústria textil: Acabamento de malhas**. Belo Horizonte: Segrac Editora e Gráfica Ltda, 2002. 356 p.

LEWIN, Menachem. **Handbook of Fiber Chemistry**. 3. ed. Boca Raton: Crc Press, 2007. 1058 p.

LI, Y.; HARDIN, I. R. Enzymatic Scouring of Cotton: Effects on Structure and Properties. **Textile Chemist and Coloris**, v. 29, n. 8, p. 71–76, 1997.

LIMA, Adriana Ferreira de *et al.* **Adsorção de azul de metileno em hidrocarbões de resíduos têxteis. Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 25, n. 4, p. 327-345, 14 nov. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200004.1185>.

LIMA, Antonio William Oliveira; ANGNES, Lúcio. Biocatálise em meios aquo-restritos: fundamentos e aplicações em química analítica. **Química Nova**, [S.L.], v. 22, n. 2, p.

229-245, abr. 1999. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40421999000200015>.

LIN, C. H.; HSIEH, Y. LO. Direct Scouring of Greige Cotton Fabrics with Proteases. **Textile Research Journal**, v. 71, n. 5, p. 425–434, 2001.

LOSONCZI, A.; CSISZÁR, E.; SZAKÁCS, G. Bleachability and Dyeing Properties of Biopretreated and Conventionally Scoured Cotton Fabrics. **Textile Research Journal**, v. 74, n. 6, p. 501–508, 2004.

LOSONCZI, A. K. **Bioscouring of Cotton Fabrics**. [s.l.] Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 2004.

MADHU, Amit; CHAKRABORTY, J.N.. Developments in application of enzymes for textile processing. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 145, p. 114-133, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.013>.

MALQUIAS JÚNIOR, João Darós. **Identificação dos componentes fibrosos dos alimentos**. Goiás, 2020. 25 slides, color. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/4383/material/identificacao%20dos%20componentes%20fibrosos%20dos%20alimentos.pdf>.

MALLER, A. **Produção, Purificação e Caracterização do Complexo Pectinolítico do Fungo Aspergillus niveus**. 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Bioquímica e Imunologia, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2008.

MARJORY, L. R. **Introductory Textile Science**, New York, Holt, Rinhart and Winston, Inc, 1977, p. 3 -87.

MAO, Y.; MILLETT, R.; LEE, C. S.; YAKUBOV, G.; HARDING, S. E.; BINNER, E. Investigating the influence of pectin content and structure on its functionality in bio-flocculant extracted from okra. **Carbohydrate polymers**, v. 241, p. 116414, 2020.

MOHANTY, A. K. et al. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview.

Macromolecular Materials And Engineering, [S.L.], v. 276-277, n. 1, p. 1-24, 1 mar. 2000. Wiley. [http://dx.doi.org/10.1002/\(sici\)1439-2054\(20000301\)276:13.0.co;2-w](http://dx.doi.org/10.1002/(sici)1439-2054(20000301)276:13.0.co;2-w).

MOJSOV, K. Enzyme Scouring of Cotton Fabrics: A Review. **International Journal Of Marketing And Technology**, S. L., v. 2, n. 9, 2012.

MONTEIRO, Valdirene Neves *et al.* Aplicações Industriais da Biotecnologia Enzimática. **Revista Processos Químicos**, [S.L.], v. 3, n. 5, p. 9-23, 2 jan. 2009. *Revistas Processos Químicos*. <http://dx.doi.org/10.19142/rpq.v3i5.83>.

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.

NIERSTRASZ, V. A. *et al.* **Advances in textile biotechnology**. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2010. 357 p.

PAIVA, J. M. F. & FROLLINI, E. "Natural Fibers Reinforced Thermoset Composites", in: Frollini, E.; Leão, A.; Mattoso, L. H. C., eds. **Natural Polymers and Agrofibers Based Composites**, p.229-55 (2000).

PENSUPA, N.; LEU, S. Y.; HU, Y.; DU, C.; LIU, H.; JING, H.; WANG, H.; LIN, C. S. K. Recent Trends in Sustainable Textile Waste Recycling Methods: Current Situation and Future Prospects. **Topics in Current Chemistry**, v. 375, p. 1–40, 2017.

PICCOLI, H. H. **Determinação do Comportamento Tintorial de Corantes Naturais em Substrato de Algodão**. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PRATTO, B. *et al.* Enzymatic Hydrolysis of Pretreated Sugarcane Straw: Kinetic Study and Semi-Mechanistic Modeling. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 178, n. 7, p. 1430–1444, 2015.

RAJENDRAN, R.; SU, S. Karthik; RADHAI, R.; RAJAPRIYA, P.. Bioscouring of Cotton

Fabrics using Pectinase Enzyme its Optimization and Comparison with Conventional Scouring Process. **Pakistan Journal Of Biological Sciences**, [S.L.], v. 14, n. 9, p. 519-525, 15 abr. 2011. Science Alert. <http://dx.doi.org/10.3923/pjbs.2011.519.525>.

RAJULAPATI, Vikky *et al.* Green bioprocess of degumming of jute fibers and bioscouring of cotton fabric by recombinant pectin methylesterase and pectate lyases from *Clostridium thermocellum*. **Process Biochemistry**, [S.L.], v. 92, p. 93-104, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2020.02.024>.

RAMADAN, A. R. Characterization of Biobleaching of Cotton/Linen Fabrics. **Journal of Textile and Apparel, Technology and Management**, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2008.

RAZA, Z. A.; REHMAN, A.; HUSSAIN, M. T.; MASOOD, R.; UL HAQ, A.; SADDIQUE, M. T.; JAVID, A.; AHMAD, N. Production of rhamnolipid surfactant and its application in bioscouring of cotton fabric. **Carbohydrate Research**, v. 391, n. 1, p. 97–105, 2014.

ROCHA, Andréa Araújo. **Curso Técnico Têxtil - Tecnologia de Acabamento**. 1. ed. Ceará. 2020, [s.d.]. Disponível em: <www.seduc.ce.gov.br>.

RUBINGH, D. N. The influence of surfactants on enzyme activity. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 1, n. 5, p. 598–603, 1996.

RYABOV, Alexander D.. **Practical Kinetics and Mechanisms of Chemical and Enzymatic Reaction**. Reino Unido: Cambridge Scholars Publishing, 2021. 263 p. (ISBN (10): 1-5275-6212-3).

R. JUNIOR, Sousa *et al.* RECENT TRENDS IN THE MODELING OF CELLULOSE HYDROLYSIS. **Brazilian Journal Of Chemical Engineering**. São Carlos, p. 545-564. 16 abr. 2011.

SANDRI, I. G. **Enzimas pectinolíticas: Seleção de linhagens fúngicas produtoras, caracterização e aplicação em processos da indústria de alimentos**. 2010. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia, Departamento de Pós-graduação em Biotecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2010.

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

SAWADA, K.; TOKINO, S.; UEDA, M. Bioscouring of cotton with pectinase enzyme in a non-aqueous system. **Journal of the Society of Dyers and Colourists**, v. 114, n. 12, p. 355–359, 1998.

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.

SHARMA, R. *et al.* **Production, purification, characterization, and applications of lipases**. *Biotechnology Advances*, S. L., v. 19, p.627-662, 2001.

SILVA, Ana Claudia *et al.* ATIVIDADE FOTODINÂMICA E CONCEITOS: um experimento demonstrativo. **Química Nova**, [S.L.], 14 nov. 2018. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170215>.

SINGH, A. *et al.* A sustainable and green process for scouring of cotton fabrics using xylanopectinolytic synergism: switching from noxious chemicals to eco-friendly catalysts. **3 Biotech**, v. 8, n. 4, p. 1–9, 2018.

SOUSA, André Luiz Nascimento de *et al.* Modificação química da pectina do melão caipira (*Cucumis melo* var. *Acidulus*). **Química Nova**, [S.L.], 5 abr. 2017. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170042>.

TONIOLLO, Michele; ZANCAN, Natália Piva; WÜST, Caroline. **INDÚSTRIA TÊXTIL: SUSTENTABILIDADE, IMPACTOS E MINIMIZAÇÃO**. In: **VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**, 4., 2015, Porto Alegre. **IBEAS**. Campus Sertão: Ibeas, 2015. v. 1, p. 1-5.

TONOLLI, Paulo Newton *et al.* A construção histórica do conceito de enzima e sua abordagem em livros didáticos de biologia. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, [S.L.],

v. 28, n. 3, p. 727-744, set. 2021. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.1590/s0104-59702021000300006>.

UENOJO, M. et al. **PECTINASES: APLICAÇÕES INDUSTRIAIS E PERSPECTIVAS**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, v. 30, n. 2, 19 jan. 2007.

VARADARAJAN, G.; VENKATACHALAM, P. **Sustainable textile dyeing processes**. Environmental Chemistry Letters, v. 14, n. 1, p. 113–122, 2016.

VIGNESWARAN, Dr. C. *et al.* **Bioprocessing of textiles**. New Delhi: Woodhead Publishing, 2014. 450 p.

VOGEL, Andreas *et al.* **Industrial Enzyme Applications**. Weinheim: British Library, 2019. 433 p.

WAN+G, Q. et al. Degradation kinetics of pectins by an alkaline pectinase in bioscouring of cotton fabrics. **Carbohydrate Polymers**, v. 67, n. 4, p. 572–575, 2007.

WANG, et al. **Bioscouring of cotton with pectinase enzyme**. Journal of the Society of Dyers Colour, n. 11, v. 114, p. 333–336, 1998.

ZANASI, R. F. **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA TÊXTIL**. 2009. 62 f. Monografia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.