



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO - CTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA TÊXTIL - PGETEX

LUCAS LUIZ VASSELAI

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO BIOTECNOLÓGICO PARA PREPARAÇÃO
AO TINGIMENTO DE TECIDO DE MALHA 100% ALGODÃO**

BLUMENAU

2024

LUCAS LUIZ VASSELAI

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO BIOTECNOLÓGICO PARA PREPARAÇÃO
AO TINGIMENTO DE TECIDO DE MALHA 100% ALGODÃO**

Projeto de Mestrado submetido ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Profa. Dra. Catia Rosana Lange de Aguiar

Coorientadora: Profa. Dra. Ana Julia Dal Forno

BLUMENAU

2024

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

Vasselai, Lucas Luiz
Desenvolvimento de processo biotecnológico para
preparação ao tingimento de tecido de malha 100% algodão /
Lucas Luiz Vasselai ; orientadora, Catia Rosana Lange de
Aguiar, coorientadora, Ana Julia Dal Forno, 2024.
102 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Blumenau, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Têxtil, Blumenau, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Têxtil. 2. Indústria Têxtil;
Biotecnologia; Enzimas. I. de Aguiar, Catia Rosana Lange .
II. Dal Forno, Ana Julia . III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Têxtil. IV. Título.

LUCAS LUIZ VASSELAI

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO BIOTECNOLÓGICO PARA PREPARAÇÃO
AO TINGIMENTO DE TECIDO DE MALHA 100% ALGODÃO**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em de abril de 2024, por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^a. Rita de Cassia Curto Valle, Dr^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a. Franciely Velozo Aragão, Dr^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Têxtil.

Prof^a. Fernanda Steffens, Dr^a
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação

Prof^a. Catia Rosana Lange de Aguiar, Dr^a
Orientadora

BLUMENAU, 2024

Este trabalho é dedicado aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela contribuição à minha formação acadêmica. À todos os funcionários da UFSC, Campus Blumenau, por todo apoio e ambiente propício para o desenvolvimento do meu trabalho de conclusão de curso.

À minha orientadora Catia Rosana Lange de Aguiar, e à minha coorientadora Ana Julia Dal Forno, por todo apoio, conhecimento compartilhado, incentivo e oportunidades ofertadas a mim ao longo da elaboração do trabalho.

À Deus e a Nossa Sra. de Caravaggio, por estarem sempre comigo em cada etapa de minha vida e por terem me dado força e sabedoria para enfrentar as adversidades.

À base de minha formação e de todas minhas conquistas até hoje, meus pais, Luizinho e Terezinha Vasselai. Agradeço pelo incentivo, por todos os ensinamentos e suporte necessário. É por vocês que hoje finalizo este trabalho, e por vocês ainda continuarei em frente.

Aos meus avós, por terem me ensinado valores que carrego comigo em todos os momentos. *Tanti grazie nonni.*

À todos os meus colegas e familiares que, de alguma forma me incentivaram a realizar não só este trabalho, mas toda a pós-graduação.

*“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo
de você, menos o seu conhecimento.”*

(Albert Einstein)

RESUMO

A presença de impurezas naturais nas fibras de algodão impede a absorção de água, gerando problemas de qualidade nos processos de tingimento. A remoção destas sujidades normalmente é realizada por limpeza alcalina em alta temperatura. As duras condições do processo convencional produzem efluentes de altos níveis de DQO e pH, além de causar degradação da celulose, o que reduz a resistência das fibras. Entretanto, a biopurga também garante a remoção destas impurezas, porém, emprega condições de processo menos severas e não agride as fibras. No presente trabalho foi investigada a utilização de enzimas combinadas, pectinase, lipase e celulase no processo de biopurga de malha 100% algodão. Para isto, as enzimas foram caracterizadas quanto às suas atividades nas condições ótimas e nas condições propostas para o processo de biopurga, e na presença de um agente surfactante. A influência do agente no tratamento enzimático também foi analisada ao se estudar dois procedimentos distintos, com a adição do agente no início do processo e com a adição deste somente após 30 min de reação. O efeito de cada enzima e suas interações foi avaliado com o auxílio de um planejamento experimental e a caracterização da malha tratada (hidrofilidade, perda de massa, grau de alvura e ao posterior tingimento). Para fins comparativos, realizou-se uma purga alcalina. Os resultados mostram que o surfactante não interferiu na atividade das enzimas. A biopurga com adição de surfactante no início do processo e nas condições de pH 6,5 e temperatura 55 °C revelou que a combinação das três enzimas nos pontos máximos do planejamento experimental apresentou os melhores resultados, grau de alvura de 24,92 °Berger e hidrofilidade de 14,36 s. Posteriormente foi reproduzido a biopurga em escala piloto, avaliando consumo, temperatura e tempo com vistas no estabelecimento de um processo de preparação em condições menos severas e financeiramente viável.

Palavras-chave: Algodão, Indústria têxtil, Biopurga, Enzimas.

ABSTRACT

The presence of natural impurities in cotton fibers prevents water absorption, generating quality problems in the dyeing processes. Removal of this dirt is normally carried out by alkaline cleaning at high temperature. The harsh process conditions produce effluents with high COD and pH levels, in addition to causing cellulose manipulation, which reduces the strength of the fibers. However, biopurging also guarantees the removal of impurities, however, using less severe process conditions and does not harm the fibers. In the present work, the use of combined enzymes, pectinase, lipase and cellulase in the biopurging process of 100% cotton mesh was investigated. For this, the enzymes were described in terms of their activities under optimal conditions and the conditions proposed for the biopurging process, and in the presence of a surfactant agent. The influence of the agent on the enzymatic treatment was also proven when studying two different procedures, with the addition of the agent at the beginning of the process and with its addition only after 30 minutes of occurrence. The effect of each enzyme and its interactions was evaluated with the help of experimental planning and the characterization of the technical mesh (hydrophilicity, mass loss, degree of whiteness and subsequent dyeing). For comparative purposes, an alkaline purge was performed. The results show that the surfactant does not interfere with enzyme activity. Biopurging with the addition of surfactant at the beginning of the process and under conditions of pH 6.5 and temperature 55 °C revealed that the combination of the three enzymes at the maximum points of the experimental design presented the best results, a brightness degree of 24.92 °Berger and hydrophilicity of 14.36 s. Subsequently, biopurging was reproduced on a pilot scale, evaluating consumption, temperature and time with a view to establishing a preparation process under less severe conditions and financially viable.

Keywords: *Cotton, Textile Industry, Biopurge, Enzymes.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações que utilizam o termo <i>bioscouring</i> entre 2014 a 2022	20
Figura 2 – Classificação dos processos químicos de preparação convencional do algodão	24
Figura 3 – Representação esquemática da estrutura do algodão	26
Figura 4 – Purga convencional para substratos de algodão	27
Figura 5 – Diferentes tipos de pectinase e seu modo de ação da molécula de pectina	35
Figura 6 – Reações catalisadas por lipases	36
Figura 7 – Atuação das enzimas componentes da celulase	38
Figura 8 – Gráfico do processo de purga alcalina	49
Figura 9 – Gráfico do processo de biopurga para o processo <i>all-in</i>	50
Figura 10 – Processo de tingimento	52
Figura 11 – Processo de ensaboamento	53
Figura 12 – Procedimentos de ensaio de solidez a cor à lavagem	55
Figura 13 – Ensaio piloto	57
Figura 14 – Programação do lote em sistema	57
Figura 15 – Fluxograma para o procedimento operacional	58
Figura 16 – Comparação da atividade pectinolítica da preparação da enzima pectinase nas condições recomendadas e nas do processo de biopurga	64
Figura 17 – Comparação da atividade lipolítica da preparação da enzima lipase nas condições recomendadas e nas do processo de biopurga	64
Figura 18 – Comparação da atividade celulolítica da preparação da enzima celulase nas condições recomendadas e nas do processo de biopurga	65
Figura 19 – Comparação da atividade pectinolítica da preparação da enzima pectinase na presença de surfactante e na ausência do mesmo	66
Figura 20 – Comparação da atividade lipolítica da preparação da enzima lipase na presença de surfactante e na ausência do mesmo	66
Figura 21 – Comparação da atividade celulolítica da preparação da enzima celulose na presença de surfactante e na ausência do mesmo	67
Figura 22 – Resultados dos ensaios de hidrofiliidade das malhas tratadas pelo processo enzimático e por purga convencional	71

Figura 23 – Gráfico de Pareto dos efeitos estimados sobre a hidrofili­dade	72
Figura 24 – Relação entre os valores observados e preditos do modelo linear para a hidrofili­dade	74
Figura 25 – Curva de contorno para a hidrofili­dade em função da atividade das enzimas pectinase e celulase.....	75
Figura 26 – Curva de contorno para a hidrofili­dade em função da atividade das enzimas pectinase e lipase	75
Figura 27 – Curva de contorno para a hidrofili­dade em função da atividade das enzimas pectinase e celulase.....	76
Figura 28 – Resultados dos ensaios de perda de massa das malhas tratadas pelo processo enzimático e por purga convencional.....	77
Figura 29 – Gráfico de Pareto dos efeitos estimados sobre a perda de massa	79
Figura 30 – Resultados dos ensaios de grau de alvura das malhas tratadas pelo processo enzimático e por purga convencional.....	80
Figura 31 – Gráfico de Pareto dos efeitos estimados sobre o grau de alvura	81
Figura 32 – Resultados dos ensaio da determinação de diferença de cor das malhas tratadas pelo processo enzimático e por purga convencional	82
Figura 33 – Gráfico de Pareto dos efeitos estimados sobre o grau de cor.....	83
Figura 34 – Comparativo entre tempo e custo do processo convencional	85
Figura 35 – Capacidade produtiva diária purga x biopurga.....	87
Figura 36 – Comparativo entre nº de partidas e volume de produção diário purga versus biopurga.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Processos têxteis e efluentes gerados	28
Quadro 2 – Enzimas aplicadas na biopreparação do algodão	31
Quadro 3 – Produtos utilizados na preparação, tingimento e ensaboamento	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das enzimas pectinolíticas.....	34
Tabela 2 – Caracterização do substrato têxtil	42
Tabela 3 – Características das enzimas	43
Tabela 4 – Reagentes empregue no tingimento.....	53
Tabela 5 – Reagentes utilizados no ensaboamento.....	54
Tabela 6 – Valores das atividades máximas, mínimas e médias das variáveis independentes do planejamento estatístico	56
Tabela 7 – Atividade principal e secundário dos caldos enzimáticos	61
Tabela 8 – Atividade específica das enzimas.....	62
Tabela 9 – Comparação entre os resultados dos processos de lavagem enzimática com a adição de surfactante no início do procedimento e com a adição após 30 min de reação	68
Tabela 10 – Caracterização das malhas tratadas por biopurga, conforme planejamento experimental, das malhas tratadas por purga convencional e crua.....	69
Tabela 11 – Tempo de umectação apresentado pelas malhas tratadas previamente pelo processo de biopurga (planejamento experimental).....	70
Tabela 12 – Parâmetros estatísticos para o planejamento fatorial 2^3	73
Tabela 13 – Análise da quantidade de água nos processos de preparação	85
Tabela 14 – Custo dos insumos	86
Tabela 15 – Custo de uma partida em máquina de capacidade de 600 kg de malha comparando o processo convencional com o novo processo	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
°Berger	Unidade de medida do grau de branco
CV	Coeficiente de Variação
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação Tratamento de Água
ETE	Estação Tratamento de Efluentes
g/cm ³	Gramas por Centímetro Cúbico
g/L	Gramas por Litro
g/m ²	Gramas por Metro Quadrado
°C	Graus Celsius
h	Hora
CIELAB	International Commission on Illumination
Kg	Kilograma
NaOH	Hidróxido de Sódio
LABENE	Laboratório de Beneficiamento
LAFIF	Laboratório de Fibras e Fiação
L	Litro
min	Minutos
m	Metro
m ³	Metro Cúbico
µm	Micrometro
mm	Milímetro
RB	Relação de Banho
s	Segundos
SECOM	Single User Orgatex Basic
Ne	Título Inglês
T	Toneladas
TSD	Total de Sólidos Dissolvidos
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2.	ESTADO DA ARTE	20
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	INDÚSTRIA TÊXTIL.....	21
3.1.1	Cadeia produtiva	22
3.2	BENEFICIAMENTO	23
3.2.1	Preparação ao tingimento	24
3.2.1.1	<i>Purga em substratos de algodão</i>	25
3.2.1.2	<i>Impactos do método convencional de purga</i>	28
3.3	BIOTECNOLOGIA	30
3.3.1	Enzimas aplicadas ao setor têxtil	30
3.4	BIOPURGA	32
3.4.1	Enzimas	32
3.4.1.1	<i>Pectinase</i>	33
3.4.1.2	<i>Lipase</i>	35
3.4.1.3	<i>Celulase</i>	37
3.4.2	Combinação de enzimas (enzymatic pool) para a biopurga	39
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
4.	METODOLOGIA	42
4.1	MATERIAIS.....	42
4.1.1	Substrato Têxtil	42
4.1.2	Enzimas	43
4.1.3	Corante	43
4.1.4	Reagentes	43
4.1.5	Equipamentos	45
4.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	45
4.2.1	Estudo das Preparações Enzimáticas	45
4.2.1.1	<i>Determinação da atividade enzimática da pectinase</i>	45
4.2.1.2	<i>Determinação da atividade enzimática da lipase</i>	46

4.2.1.3	<i>Determinação da atividade enzimática da celulase</i>	47
4.2.1.4	<i>Análise da influência do agente surfactante na atividade das enzimas</i>	48
4.2.2	Tratamento Prévio da Malha de Algodão	48
4.2.2.1	<i>Purga Alcalina</i>	48
4.2.2.2	<i>Purga Enzimática</i>	49
4.2.3.	Avaliação da Malha Tratada	50
4.2.3.1.	<i>Hidrofilidade</i>	50
4.2.3.2.	<i>Perda de massa</i>	51
4.2.3.3.	<i>Grau de alvura</i>	51
4.2.3.4.	<i>Caracterização do comportamento tintorial</i>	51
4.2.3.4.1.	<i>Tingimento</i>	52
4.2.3.5.	<i>Solidez à lavagem</i>	54
4.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL ESTATÍSTICO	55
4.4	ENSAIO PILOTO	56
4.4.1	Análise econômica	59
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	CARACTERIZAÇÃO ENZIMÁTICA	61
5.1.1	Determinação das atividades enzimáticas	61
5.1.1.1	<i>Atividade observada nas condições do processo enzimático</i>	63
5.1.2	Avaliação da influência do sequestrante na atividade das enzimas	65
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS MALHAS TRATADAS	67
5.2.1	Avaliação da influência do sequestrante nas características posteriores ao tratamento enzimático	68
5.2.2	Caracterização da malha purgada por lavagem alcalina ou biopurga .	69
5.2.2.1	<i>Hidrofilidade</i>	70
5.2.2.2.	<i>Perda de Massa</i>	76
5.2.2.3.	<i>Grau de alvura</i>	79
5.2.2.4.	<i>Grau de tingimento</i>	81
5.2.2.5.	<i>Solidez</i>	83
5.3	ANÁLISE ECONÔMICA.....	84
6.	CONCLUSÃO	89
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92

1. INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é uma das mais antigas e diversificadas, presente na maioria dos países, abrangendo distintas categorias de consumo com enorme impacto sócio-político, econômico e cultural (FUJITA; JORENTE, 2015). Com aproximadamente 200 anos de história no Brasil, é a quinta maior a nível global (ABIT, 2020). Por sua vez, o algodão é uma importante fibra natural e um dos materiais mais utilizados (DEMIR *et al.*, 2018).

Devido à insuficiência de absorção de água e alvura do algodão cru, as fibras passam por diversos processos químicos de preparação têxtil a fim de obter o desempenho adequado ao uso (AGRAWAL, 2005). A purga alcalina é bem-sucedida na remoção de impurezas hidrofóbicas, entretanto, altos índices de produtos químicos, energia e água são necessários, resultando em emissões de gases de efeito estufa, rejeitos sólidos e líquidos contaminados (HASANBEIGI; PRICE, 2015). Ademais, é realizada em condições severas de pH e temperatura, o que causa a despolimerização da celulose com consequente redução da resistência física das fibras de algodão (HAITAO; JIANYONG, 2019). Enzimas são proteínas biodegradáveis e sua utilização ajuda a superar os problemas citados anteriormente. A biopreparação de fibras têxteis é um campo promissor, onde componentes presentes nas fibras como gorduras, ceras e pectinas são substratos ideais para determinadas classes de enzimas (ANDREAUS *et al.*, 2019). Estas mesmas operam em condições amenas, pH neutro e menor consumo de água.

A biopreparação é segura, facilmente controlada e atua apenas em compostos específicos na superfície da fibra de algodão. As enzimas comumente estudadas par este fim são pectinases, lipases e celulasas. Por exemplo, a pectinase, é a enzima que degrada a pectina, sendo a mais eficaz para os tecidos de fibra celulósicas (AGRAWAL *et al.*, 2007).

Portanto, os processos enzimáticos é uma alternativa aos convencionais, oferecendo alta especificidade para a remoção dos compostos das fibras de algodão cru, e atuam em temperaturas inferiores (60 °C) em comparação ao processo alcalino, que ocorre entre 95-100 °C, resultando em menor consumo de energia, além de ser

um processo ecologicamente mais favorável e causar menos danos à estrutura das fibras celulósicas.

No entanto, apesar das técnicas de biopurga apresentar êxito, pesquisadores ainda lutam para estender a visão do laboratório à escala industrial (SHAHID *et al.*, 2016). Para convencer os fabricantes do setor têxtil a alterarem processos convencionais a enzimáticos, este último deve custar menos, gerar efluente em menor volume e ser mais fácil para tratar, além de apresentar uma melhor qualidade do substrato têxtil (HARDIN, 2010). Assim, este trabalho objetiva estudar um “*pool enzimático*” e desenvolver um processo de biopurga específico para a malha 100% algodão.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um processo enzimático de preparação de tecido de malha 100% algodão, investigando as melhores condições das combinações enzimáticas, além de seu desempenho e eficiência em escala laboratorial e industrial.

1.1.2 Objetivos Específicos

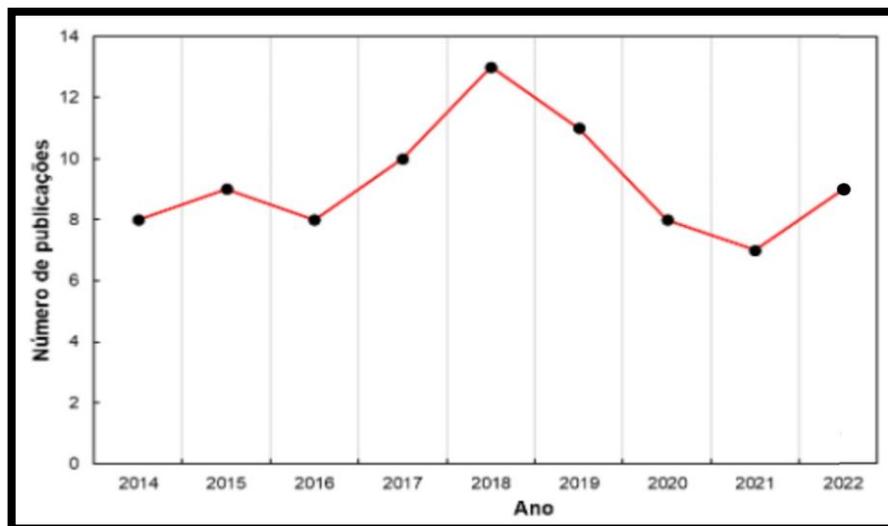
- a) Estudar as enzimas pectinase, lipase e celulase quanto à sua atividade;
- b) Analisar a influência do agente surfactante do processo de biopurga na atividade das enzimas;
- c) Determinar a melhor combinação enzimática, entre pectinase, lipase e celulase na biopreparação;
- d) Caracterizar os substratos têxteis quanto à hidrofiliidade, perda de massa e grau de alvura;
- e) Validar o processo desenvolvido em escala laboratorial, em aplicação industrial (equipamento com capacidade de 50 kg), e comparar os resultados obtidos;
- f) Determinar a análise econômica do processo enzimático em comparação ao convencional;

2. ESTADO DA ARTE

A fim de verificar o estado da arte sobre o processo de biopurga, este trabalho buscou estudos publicados nos últimos dez anos, por meio da utilização da base de dados Scopus. Para tanto, utilizou-se “*bioscouring*” como palavra-chave, bem como, aplicação de filtro de período (2014 – 2022), idioma (inglês) e tipo de publicação (artigo, conferência, livros e revisões) para a realização da busca. O resultado obtido para a análise bibliográfica foi de 84 publicações ao longo da última década.

A Figura 1 demonstra a quantidade de publicações para cada ano considerado. Nota-se que durante os primeiros cinco anos houve um pequeno aumento no número de estudos publicados. Entretanto, a partir de 2019 as investigações sobre o tema obtiveram queda constante até 2021, no qual, voltou a ser objeto de estudo e assim, tendo um acréscimo no número de trabalhos publicados.

Figura 1 – Número de publicações que utilizam o termo *bioscouring* entre 2014 a 2022



Fonte: O autor (2024)

Destaca-se que 17,4% das publicações encontradas foram divulgados em periódicos de áreas destinadas à bioquímica, genética e biologia molecular, 15,8% dedicados a engenharia química, 13,2% a ciência dos materiais, 12,1% para engenharia em geral e 9,5% centrados em ciência ambiental. O percentual restante

(32%) engloba áreas como agricultura, química, energia, microbiologia, dentre outros. É interessante verificar que dentre os trabalhos mais citados, alguns retratam o processo de biopurga investigado em função da enzima pectinase (COLOMBI *et al.*, 2022; GARG *et al.*, 2016; KOHLI; GUPTA, 2015; ZHOU; ZUE; MA, 2017).

Em seguida, têm-se estudos que abordam a utilização de celulase para operações biotecnológicas em substratos de algodão e outras fibras celulósicas (KAUR *et al.*, 2016; SINGH *et al.*, 2020; SINGH *et al.*, 2018). Além disso, é possível encontrar publicações relacionadas ao pré-tratamento enzimático empregando lipase (NERURKAR; JOSHI; ADIVAREKAR, 2015), glicose oxidase (MOJSOV, 2019), lacase oriunda de resíduos agrícolas, como também, “enzymatic *pool*” com diferentes tipos de enzimas (KALANTZI; KEKOS; MAMMA, 2019). Sobretudo, ressalta que alguns dos principais estudos obtidos através da busca da literatura serão mencionados neste mesmo trabalho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os processos que utilizam enzimas no tratamento do algodão requerem um embasamento teórico sobre as propriedades das fibras de algodão, bem como sua composição, além das características das enzimas aplicadas nestes processos. Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura sobre a indústria têxtil e o cenário em que se insere, aprofundando sobre os processos de biotecnologia, com ênfase nas enzimas de pectinase, lipase e celulase.

3.1 INDÚSTRIA TÊXTIL

O setor têxtil é uma das indústrias mais dinâmicas da atualidade. Sabe-se que é caracterizado pela transformação inicial de fibras em fios, tecidos, malhas e não tecidos, que passam por inúmeros processos até a entrega do produto final, como peças de vestuário, cama, mesa, banho e artigos técnicos (FRONZAGLIA *et al.*, 2020). No Brasil, a implementação do setor foi dada em meados do século XIX, onde teve grande oscilação na participação da atividade social e econômica nacional até atingir maturidade em 1940. Durante a Segunda Guerra Mundial, o país alcançou a segunda posição na produção mundial de têxteis e a partir disso, conquistou cada vez

mais espaço como importante setor da indústria nacional. No qual, foi consolidado na década de 80 caracterizando-se, na época, como atividade de lucro rápido sem a necessidade de grande investimento (KON; COAN, 2005; LISBOA, 2013; FILLETI; BOLDRIN, 2020).

Atualmente, a indústria brasileira produz um volume médio de 2,16 milhões de toneladas de materiais têxteis e 8,1 bilhões de peças de vestuário. Além disso, possui cerca de 22,5 mil unidades produtivas que absorvem, aproximadamente, 10 milhões de colaboradores diretos e indiretos, conforme dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e Confecção (ABIT, 2023).

A cadeia têxtil pode ser dividida, basicamente, em fiação, tecelagem/malharia, beneficiamento e confecção (PERIYASAMY; TEHRANI-BAGHA, 2022). No qual, cada etapa fabril possui distinções de acordo com o material têxtil em processamento (tipo de fibra, fio e estrutura), bem como, as características pretendidas para o produto final (HERNANDEZ; NOWACK; MITRANO, 2017).

3.1.1 Cadeia produtiva

As fibras são a matéria-prima primordial para a base de todos os produtos têxteis. São oriundas de fontes naturais ou produzidas em ambiente industrial, no caso, as manufaturadas (sintéticas e artificiais). Durante o processo de fiação, os filamentos (fibras de comprimento indefinido) são combinados e torcidos a fim de originar os fios. Por outro lado, as fibras descontínuas (fibras de comprimento limitado) são fiadas com o mesmo intuito, ou seja, formação de fios (SINCLAIR, 2015).

Após a etapa de fiação, tem-se a tecelagem, responsável pela formação dos tecidos, a qual pode se dar por meio do entrelaçamento perpendicular entre, no mínimo dois fios: urdume, direção longitudinal; trama, direção transversal (STANKARD, 2015). Outro método é a malharia, caracterizada por ser um método de grande versatilidade para a produção de estruturas têxteis e neste caso, constitui-se do entrelaçamento de uma série de laçadas, formadas a partir de agulhas (POWER, 2015).

Os tecidos e malhas produzidos, normalmente, seguem para o processo de beneficiamento que compreende uma série de métodos que visam agregar

características físicas e químicas as estruturas têxteis. Nesta etapa, a manufatura é preparada, tingida, estampada e por fim, acabada. Entretanto, deve-se ter em mente que cada tecido/malha pode ser beneficiado de inúmeras formas, dependendo das necessidades/funcionalidades pretendidas para o produto final (HAUSER, 2015). Mais detalhes sobre estes processos serão abordados nas próximas seções, visto serem importantes para o desenvolvimento do trabalho em questão.

Por fim, têm-se o processo de confecção responsável pela união das estruturas têxteis no intuito de originar vestimentas, artigos para o lar (cama, mesa e banho) ou outros produtos dedicados a atividades industriais (filtros, embalagens, dentre outros). Ou seja, consiste na etapa de encaixe, corte e costura do material (MCLOUGHLIN; MITCHELL, 2015).

3.2 BENEFICIAMENTO

O beneficiamento têxtil pode ser dividido em três estágios principais: pré-tratamento ou preparação, tingimento (coloração e estamparia) e acabamento (WOLFGANG; HAUSER, 2004). Primeiramente, o pré-tratamento tem como objetivo preparar os materiais têxteis para os processos subsequentes, no caso, tingimento, estamparia e acabamento. Assim, pode ser realizado sobre fibras, fios, tecidos e malhas. Nesta etapa, diversas impurezas presentes na matéria-prima crua devem ser removidas a fim de melhorar a uniformidade do material e assim, torná-lo apto para as próximas etapas. Portanto, a eliminação de compostos naturais presentes na superfície das fibras celulósicas naturais como pectina, cera, proteína e outros, garante as características necessárias para os processos futuros em virtude do aumento da absorvidade do material (KOLANJIKOMBIL, 2019).

O tingimento e estamparia, por sua vez, como propriamente dito, são responsáveis por conferir cor e outros aspectos visuais (estampas) aos substratos têxteis. Sendo assim, visando atender a requisitos estéticos dos produtos (VIGO, 1994).

Por fim, o acabamento tem como objetivo melhorar a aparência ou utilidade dos têxteis. Em geral, todos os processos de beneficiamento podem estar situados como etapas de acabamento. Entretanto, cita-se que o termo é mais adequado para

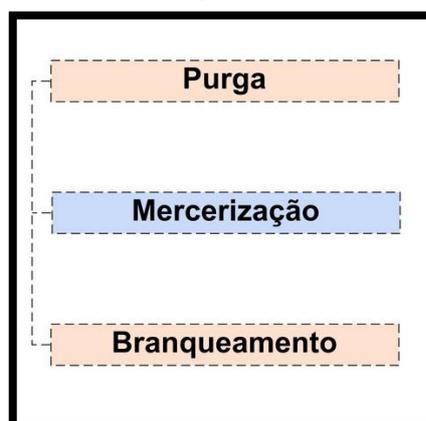
processos após a preparação e o tingimento. Os métodos de acabamento permitem alterar a estética e/ou propriedades físicas e químicas de substratos têxteis e, portanto, agregam valor comercial ao produto, considerando aparência, brilho, manuseio, caimento, usabilidade, dentre outros (CHOUDHURY, 2017).

3.2.1 Preparação ao tingimento

Como previamente citado, um dos processos fundamentais da cadeia produtiva, é o pré-tratamento dos substratos têxteis. No intuito de impulsionar a uniformidade e absorvidade sem causar demasiado dano ao material, diversas técnicas podem ser adotadas para a execução do processo (KOLANJIKOMBIL, 2019).

É importante salientar que as etapas do pré-tratamento, tanto físicas quanto químicas, são realizadas de acordo com o tipo de material a ser processado. Ou seja, a partir das diferentes possibilidades de utilização de fibras têxteis, cada processo e combinação, dependerá das características do material a ser produzido. Assim, algumas operações podem ser adicionadas ou removidas do processo, bem como, o maquinário necessário e os constituintes químicos utilizados (PANDA; SEM; MUKHOPADHYAY, 2021). Com ênfase na preparação química do algodão, a Figura 2 exemplifica seu fluxo, todavia, nem todas são obrigatórias ou seguem esta sequência.

Figura 2 – Classificação dos processos químicos de preparação convencional do algodão



Fonte: Adaptado de KOLANJIKOMBIL (2019)

A purga, técnica tradicional empregada sob fervura combinada com agentes alcalinos e surfactantes, tendo como objetivo preparar o material para a etapa seguinte. Assim, sua limpeza remove as impurezas que dão as características hidrofóbicas (cera e pectina) aos substratos de algodão, permitindo que estes assumam maior molhabilidade (TANAPONGPIPAT *et al.*, 2008; VARADARAJAN; VENKATACHALAM, 2015). É importante destacar que a purga se faz necessária em virtude da presença de impurezas como a pectina contida na superfície em fibras celulósicas naturais. Este composto químico (pectina) influencia nas características fisiológicas das fibras, como rigidez, permeabilidade, capacidade de retenção de água e mecanismos de defesa. Assim, se não removidas adequadamente, acaba por limitar o processamento de substratos têxteis (SHARMA *et al.*, 2022).

A mercerização ao se utilizar compostos alcalinos ou tratamento em solução de amônia, impulsiona a absorção de umidade, corantes e outras propriedades funcionais dos tecidos. Por fim, tem-se a etapa de branqueamento a qual, emprega agentes branqueadores e óticos para melhorar a aparência e uniformidade dos tecidos, adequando-os assim para as outras duas etapas de beneficiamento, tingimento e acabamento (VIGO, 2013).

3.2.1.1 *Purga em substratos de algodão*

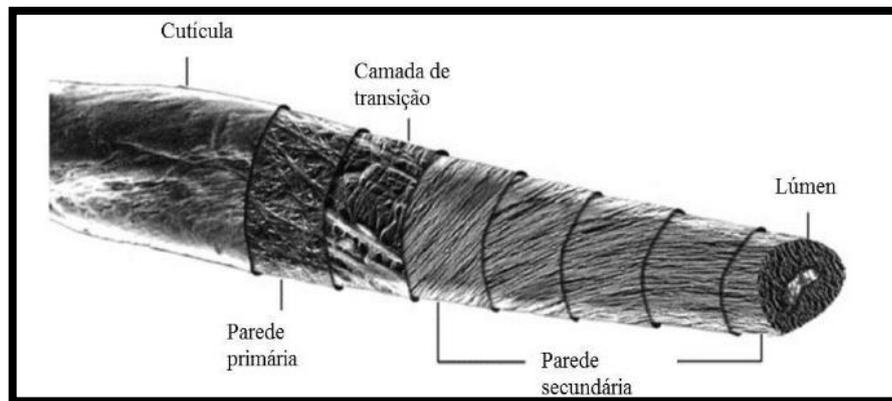
Dentre as opções disponíveis para fibras têxteis, o algodão é a matéria prima natural mais aplicada no setor. É amplamente empregado em virtude de suas propriedades atrativas, biodegradabilidade, disponibilidade e custo (FRANKE; NORTHEIM; BLACK, 1994; AHMAD; ULLAH; ZIAUDDIN, 2020).

A fibra de algodão é predominantemente composto de celulose (GORDON; HSIEH, 2007) e possui quatro camadas essenciais em sua estrutura, que estão ilustradas na Figura 3, em destaque a cutícula e a parede celular primária. A cutícula é uma fina camada externa composta por ceras, proteínas e pectinas, que preserva o algodão a penetração de água (LI; HARDIN, 1997).

A parede celular primária tem 0,1 μm de espessura, o que representa apenas 1% da espessura total da fibra, e consiste em 52% de celulose com uma mistura complexa de pectinas, ceras, proteínas, cinzas e outros compostos orgânicos

compreendendo o restante (ETTERS, 1999). A parede secundária é a camada mais espessa (91,5% da massa da fibra). É organizada em microfibrilas e macrofibrilas, que são mantidas unidas por fortes interações pontes de hidrogênio. É constituída de camadas concêntricas, S₁ (externa) e S₂ (interna). Já o lúmen apresenta-se sob a forma de um canal central das fibras e só pode ser observada em fibras de algodão muito maduras. Nesta camada a disposição do feixe de fibrilas é similar a S₁, sendo assim distinto da camada S₂ (LI; HARDIN, 1997; MOJSOV, 2012).

Figura 3 – Representação esquemática da estrutura do algodão



Fonte: CIECHANSKA; WESOLOWSKA; WAWRO (2009)

Quimicamente, toda fibra de algodão contém 92% de celulose, em média, e o resto são impurezas naturais não celulósicas, que constituem por volta de 8% da massa total e estão presentes na (ou perto da) parede celular primária (MOJSOV, 2019).

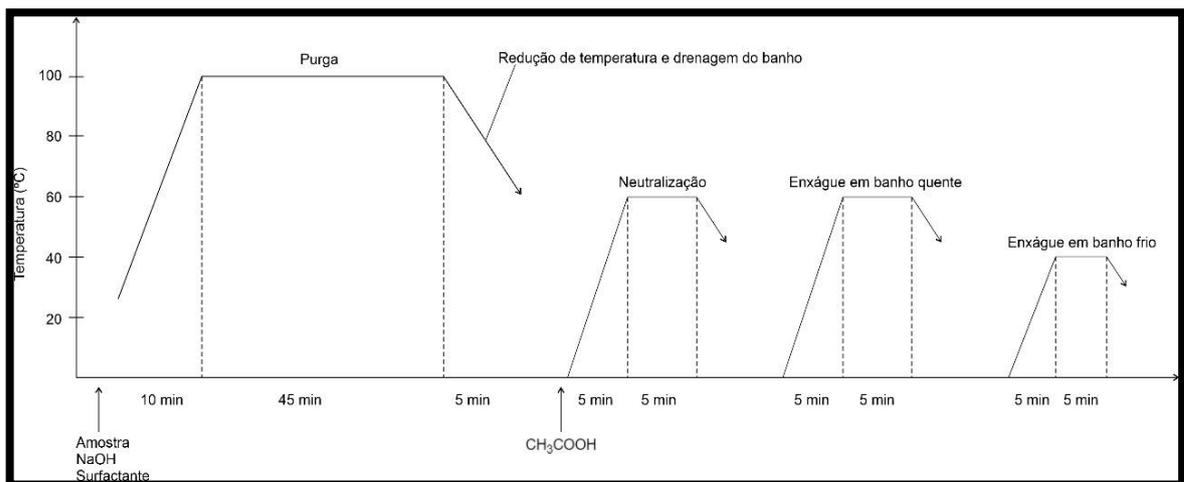
Os constituintes não celulósicos, atribuem ao algodão cru uma proteção hidrofóbica e uma superfície lubrificada (WAKELYN *et al.*, 2006), limitando fortemente a absorção de água e a alvura da fibra de algodão (MOJSOV, 2019). Devido à natureza hidrofóbica e cores indesejadas, o tecido necessita ser preparado, limpo e convertido em hidrofílico, com finalidade de alcançar absorção de água e uniformidade de cor efetiva.

O processo de preparação convencional do algodão ocorre por purga alcalina, com hidróxido de sódio e outros produtos químicos, em temperatura elevada e

acompanhada de etapas de lavagem (VARADARAJAN; VENKATACHALAM, 2016). O resultado obtido é uma fibra de celulose quase pura (teor > 99%) e com boa absorção de água (WAKELYN *et al.*, 2006). Contudo, a preparação representa o estágio mais agressivo, com eminente consumo de energia, produção de efluentes tóxicos, poluição ambiental, despolimerização da celulose e queda na resistência dos materiais (RAMADAN, 2008).

A purga de substratos de algodão, convencionalmente, é realizada em meio alcalino empregando hidróxido de sódio (NaOH), com pH entre 10 a 12, sob efeito de temperatura em torno de 100 °C e período médio de 1 hora e 30 minutos de processo (PANDA; SEM; MUKHOPADHYAY, 2021). A Figura 4 demonstra o processo de purga para o algodão, no qual, inicia-se com inserção do tecido em banho à temperatura de 25 °C, seguido da adição do hidróxido de sódio e do agente surfactante. Após isso, eleva-se a temperatura de banho para 95 a 100 °C, mantendo este nível por cerca de 45 minutos. Posteriormente, a temperatura é reduzida e faz-se a drenagem do banho. Em seguida o substrato passa por um processo de neutralização com ácido acético (CH_3COOH) em pH 7,0 a 60 °C por 10 min. Por fim, realiza-se os enxágues, a quente (60 - 70 °C) e à frio (30 - 40 °C), conforme explica Al-Mamun *et al.*, (2017).

Figura 4 – Purga convencional para substratos de algodão



Fonte: Adaptado de AL-MAMUN *et al.* (2017)

Entretanto, volumes altos de água, energia e químicos são inevitavelmente consumidos para que a técnica seja bem executada (NASSIF, 2019). Além do custo, processos similares e comuns para indústria têxtil, resultam em efluente com elevada carga de químicos indesejáveis e, portanto, tornando-se um grande problema no que diz respeito ao meio ambiente (VARADARAJAN; VENKATACHALAM, 2015; TZANOV *et al.*, 2001). Neste sentido, métodos alternativos devem ser investigados no intuito de melhorar os processos fabris, como também, as responsabilidades ambientais.

3.2.1.2 Impactos do método convencional de purga

Dentre os processos têxteis, diversos estudos apontam que a utilização de químicos é prejudicial, principalmente, na gestão e tratamento de resíduos líquidos. Sabe-se que o efluente têxtil é caracterizado por alta Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Biológica de Oxigênio (DBO), Total de Sólidos Dissolvidos (TSD), coloração e pH (VARADARAJAN; VENKATACHALAM, 2016; RAMASAMY *et al.*, 2012; NTULI *et al.*, 2009; PONNUSAMI; SRIVASTAVA, 2009). Assim, tratando-se de etapas do processo produtivo, o pré-tratamento possui operações que contribuem para a geração de efluentes e que assim, devem ter atenção sobre os métodos convencionais. O quadro 1 sumariza as principais etapas de preparação de malha de algodão elencando os compostos utilizados e as características dos efluentes gerados.

Quadro 1 – Processos têxteis e efluentes gerados

Processo	Constituintes químicos	Efluente líquido
Purga	Agente alcalinos (hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio e carbonato de sódio) Tensoativos (estearato de sódio, alquil benzeno sulfonatos, cloreto de cetil piridínio, álcool primário etoxilado e ácidos graxos etoxilados)	Água com impurezas contendo ceras de algodão, pigmentos e agentes de limpeza

	Emulsificantes (alquil aril sulfonatos, álcoois graxos e ácidos graxos)	
Branqueamento	Agentes oxidantes (peróxido de hidrogênio, peróxido de sódio, ácido peracético, pó clareador, hipoclorito de sódio e clorito de sódio) Agentes redutores (dióxido de enxofre, hidrossulfito de sódio e bissulfitos de sódio) Agentes umectantes	Águas residuárias contendo agentes branqueadores após lavagem, bem como, sujidades e óleos
Mercerização	Hidróxido de sódio e amônia Agentes umectantes Surfactantes	Águas contendo agentes alcalinos e mercerizantes com pH altamente alcalino

Fonte: Adaptado de VARADARAJAN e VENJATACHALAM (2016)

Especificamente sobre a purga convencional, Tzanov *et al.*, (2001) explica que sob as condições de lavagem em meio alcalino e alta temperatura, a celulose do algodão torna-se muito suscetível a danos por oxidação. Com conseqüente, a redução da resistência do material têxtil. Além disso, a limpeza proporcionada através da operação de purga ocasiona encolhimento dos tecidos e malhas, como também, outras alterações nas propriedades físico-mecânicas dos tecidos (ETTERS *et al.*, 1999; BUSCHLE-DILLER *et al.*, 1998; TZANOV *et al.*, 2001; ANDREAUS *et al.*, 2021).

Neste sentido, tecnologias conectadas com a preservação do meio ambiente, bem como adequadas a otimização dos processos têxteis vem sendo amplamente investigadas no intuito de inovar os métodos convencionais. Dentre as quais se tem destacado estudos sobre biotecnologias que trazem a redução de custos, insumos (químicos), volume de água, impactos ambientais e utilização de energia para as operações fabris têxteis (SHAHID *et al.*, 2016).

3.3 BIOTECNOLOGIA

A utilização de tecnologias verdes é uma das alternativas mais promissoras para o desenvolvimento dos setores industriais e principalmente, para os processos de beneficiamento têxtil. Elas promovem uma indústria mais sustentável e ecológica, além de agregar valor ao produto final. A biotecnologia contribui com o aumento da qualidade de vida humana quando estabelece produtos e serviços a base de insumos biológicos, sustentáveis e renováveis. Sobretudo, tem potencial sobre a redução da geração de poluentes e emissões de gases tóxicos, conservação do volume de recursos hídricos, energia e matérias-primas, promovendo assim o crescimento bioeconômico (EDI; IBRAHIM, 2019; RADHAKRISHNAN; SHANTHI, 2014; SAXENA; RAJA; ARPUTHARAJ, 2017).

Os processos biotecnológicos aplicados aos têxteis sugerem inovações nos processos para a produção de fibras de base biológica, como por exemplo, celulose bacteriana, algodão orgânico e outras fibras naturalmente coloridas. Tratamentos enzimáticos em processos úmidos (beneficiamento), biopolímeros e biomateriais, soluções para corantes naturais, biossensores e bioacabamentos, além de bioprocessos para o tratamento de efluentes (EDI; IBRAHIM, 2019; BHALA *et al.*, 2012; MADHU; CHAKABORTY, 2017; CHOUDHURY, 2014).

3.3.1 Enzimas aplicadas ao setor têxtil

O estudo sobre enzimas tem cada vez mais ganhado destaque entre as pesquisas. Definidos como materiais proteicos formados por aminoácidos, estes são conhecidos por serem catalisadores biológicos que aumentam a velocidade de reações químicas. Isto se deve ao fato da sua própria especificação, a qual permite que as enzimas sejam eficientes ao promover as reações sem alterações ou serem consumidas.

Em seus trabalhos Bristi *et al.*, (2019), Edi e Ibrahim (2019), Rahman (2020), Singh *et al.*, (2020) citam que as enzimas são alternativas *ecofriendly* eficientes para

a substituição de compostos químicos convencionais, largamente utilizados nos processos de beneficiamento de tecidos/malhas de material natural (algodão, lã, etc).

Os autores comentam que existem diversas possibilidades de enzimas disponíveis no mercado para a cadeia produtiva têxtil e que assim, contribuem para o desenvolvimento sustentável do setor. Os mesmos continuam afirmando que as enzimas, para além de serem insumos ecológicos, possibilitam a redução dos impactos ambientais da indústria (emissão de gases, geração de efluentes, consumo de produtos químicos, energia, dentre outros). O Quadro 2 demonstra a disponibilidade de uma série de enzimas presentes no mercado e estudos relacionados as mesmas.

Quadro 2 – Enzimas aplicadas na biopreparação do algodão

Enzimas	Referências
Pectato liase	(AGRAWAL <i>et al.</i> , 2008); (KALANTZI <i>et al.</i> , 2013); (SILVA <i>et al.</i> , 2017); (BRISTI; PIAS; LAVLU, 2019); (CHOE <i>et al.</i> , 2004); (NIAZ <i>et al.</i> , 2011);
Celulase	(HEBEISH <i>et al.</i> , 2009);
Lipase	(KALANTZI <i>et al.</i> , 2013); (KALANTZI; KEKOS; MAMMA, 2019);
Cutinase	(DEGANI, 2021);
Protease	(KALANTZI; KEKOS; MAMMA, 2019);
Xilanase	(KALANTZI; KEKOS; MAMMA, 2019);

Fonte: Adaptado de EDI e IBRAHIM (2021)

As enzimas pectinases diminuem o percentual dos constituintes não celulósicos (impurezas) e apresentam resultados superiores de absorção de água (ABDULRACHMAN *et al.*, 2017). A necessidade da utilização de outras enzimas simultaneamente no processo de biopreparação auxilia na remoção das impurezas insolúveis, substâncias lipídicas, e na quebra da cutícula e da parede do algodão (NIAZ *et al.*, 2011).

3.4 BIOPURGA

A biopurga, assim como a purga, tem como objetivo remover as impurezas sobre a superfície de fibras celulósicas naturais (algodão, juta, linho, cânhamo, dentre outros). Contudo, a biopurga destaca-se frente à operação convencional, tendo em vista que faz o mesmo processo em condições menos agressivas. Isto se deve ao fato que a remoção da pectina e outras sujidades ocorrem sem a degradação da celulose, impactando menos sobre as propriedades dos substratos. Bem como, utiliza-se menor volume de água durante os ciclos de lavagem e assim, reduz o consumo de recursos e a geração de efluentes (KOLAMJIKOMBIL, 2019).

A relevância de processos alternativos, como a biopurga enzimática, se mostra significativo. Normalmente, o processo convencional com alta concentração de álcalis e outros auxiliares, requer em média 240 L de água e 1 kg de vapor para cada 1 kg de malha. Por outro lado, dados sugerem que o consumo de água médio em operações biotecnológicas é de 30 a 70% menor quando comparado ao processo de pré-tratamento tradicional, dependendo da quantidade de banhos e lavagens (PREŠA; TAVČER, 2009).

Além disso, estudos relatam que a biopurga comparada com a purga convencional, tem desempenho melhor quanto a hidrofiliidade, capilaridade e toque dos substratos têxteis, entretanto, possuem resistência à aplicação industrial por conta dos custos da produção de enzimas (SINGH *et al.*, 2020).

3.4.1 Enzimas

As enzimas são catalisadores biológicos, constituídos de proteínas tridimensionais complexas, formadas a partir de cadeias polipeptídicas.

Convencionalmente, as enzimas aplicadas em processos industriais são provenientes de fontes fúngicas ou bacterianas. Assim, para que as operações sejam executadas, as enzimas dependem de alguns fatores que influenciam a sua atividade. A literatura cita como parâmetros importantes: temperatura, concentração de enzima e substrato, tempo de reação, pH, presença de ativadores ou inibidores. Dentre os quais, a temperatura e o pH devem ter significativa atenção, tendo em vista que ambos podem alterar a forma da enzima e assim, impedir que o mecanismo de “chave e fechadura” seja efetivo. Portanto, fatores primordiais para o bom desempenho de processo (KOLAMJIKOMBIL, 2019).

3.4.1.1 *Pectinase*

São produzidas por uma ampla variedade de bactérias, leveduras e fungos filamentosos, além de insetos e plantas, com o objetivo de degradar o heteropolissacarídeo pectina (MALLER, 2008). Devido à presença de diversas formas de pectina nas células das plantas, são necessárias enzimas com diferentes modos de ação para sua degradação (GUMMADI; PANDA, 2003).

A classificação feita de acordo com o substrato preferencial resulta em dois grupos principais: pectinases despolimerizantes e pectinase desmetoxilante. As enzimas despolimerizantes agem catalisando a quebra das ligações α -1,4 da cadeia principal do polissacarídeo péctico, enquanto a desmetoxilante desesterifica a pectina a ácido péctico por remoção dos resíduos metoxila (SANDRI, 2010; SANTI, 2005).

Há somente uma enzima pectinase desmetoxilante, a pectinesterase (PE). Já as pectinases despolimerizantes constituem em um grupo e são classificadas de acordo com o modo pelo qual a ligação é quebrada (hidrólise ou trans-eliminação); posição de ataque no substrato (endopectinase ou exopectinase); e o tipo de substrato hidrolisado (ácido péctico ou pectina). Entre as pectinases despolimerizantes encontram-se a poligalacturonase (PG), a polimetilgalactunorase (PMG), a pectina liase (PL) e a pectatoliase (PGL) (SANDRI, 2010, SANTI, 2005). Um resumo da classificação das enzimas pectinolíticas encontra-se na Tabela 1 e seu modo de ação na Figura 5.

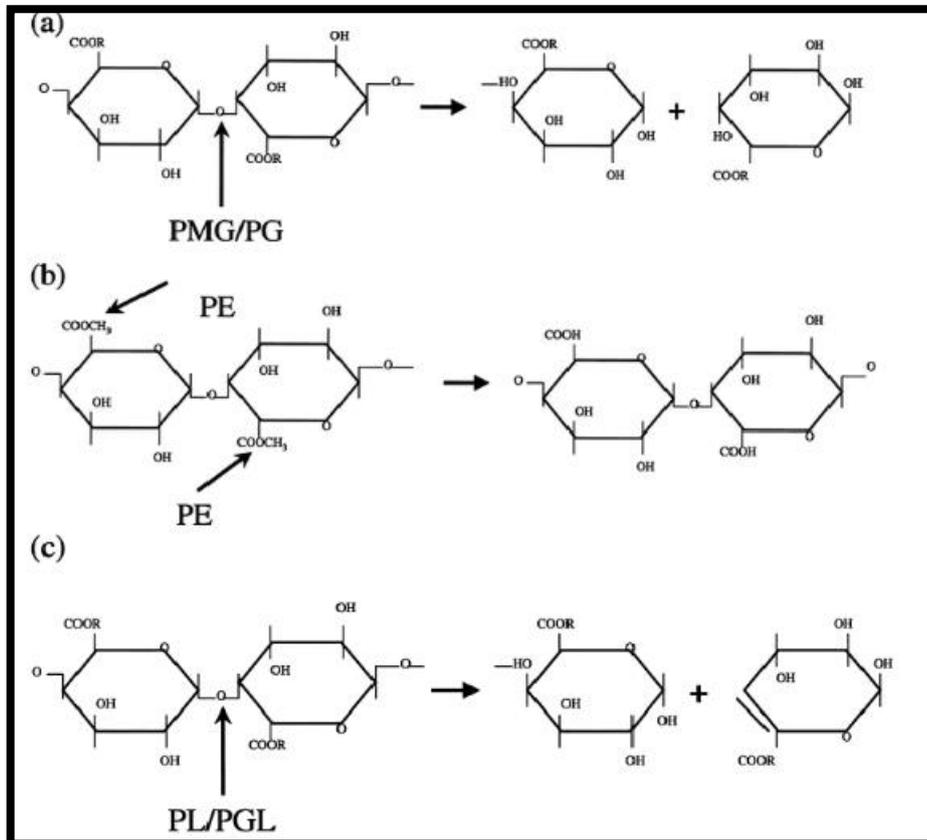
Tabela 1 – Classificação das enzimas pectinolíticas

Enzima	Substrato preferencial	Modo de ação
Poligalacturonase (PG)	Ácido péctico	Hidrólise endo-PG ou exo-PG 1 e exo-PMG 2
Polimetilgalacturonase (PMG)	Pectina	Hidrólise endo-PMG ou exo-PMG
Pectina liase (PL)	Pectina	Trans-eliminação endo-PL ou exo-PL
Pectatoliase (PGL)	Ácido péctico	Trans-eliminação endo-PAL ou exo-PAL
Pectinesterase (PE)	Pectina	Desesterificação de grupos metil

Fonte: SANTI, 2005

A produção de pectinases em larga escala é realizada principalmente por fungos, com os do gênero *Aspergillus* sendo os mais comumente utilizados (EINSCHLAG, 2011). Os preparados enzimáticos disponíveis no mercado são complexos enzimáticos que contêm todas as enzimas do grupo pectinolítico, além de celulase e hemicelulase, possuindo, portanto, diversos tipos de atividades (SANDRI, 2010).

Figura 5 – Diferentes tipos de pectinase e seu modo de ação da molécula de pectina



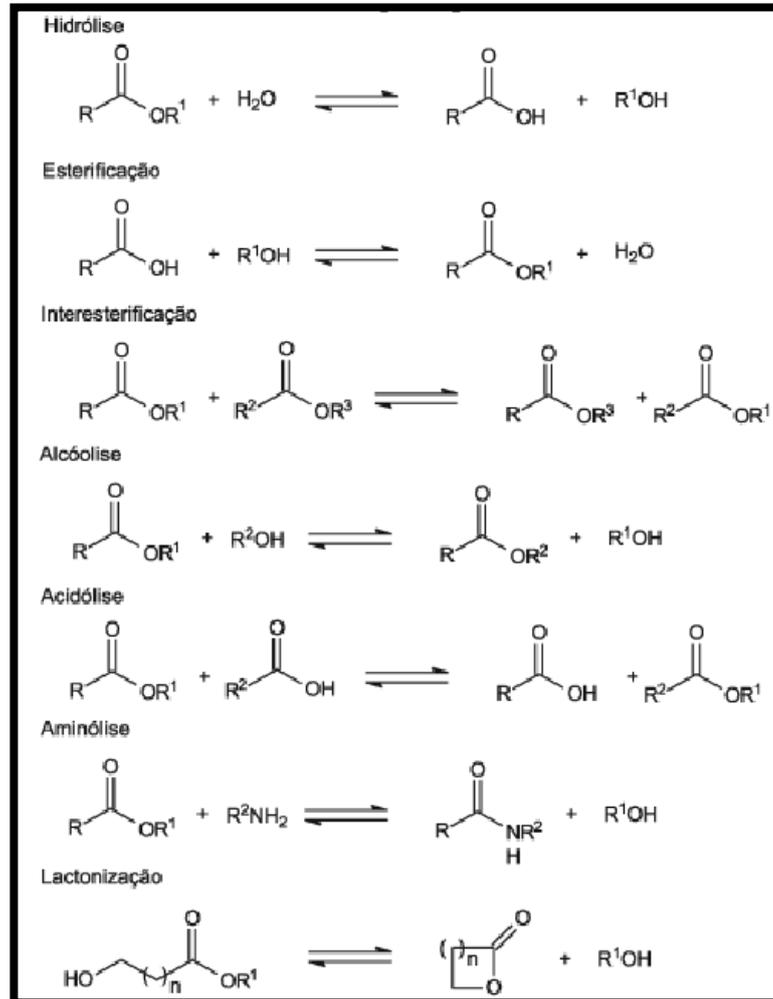
Fonte: GUMMADI, PANDA, 2003

As pectinases estão atualmente entre as enzimas com melhores perspectivas para futuras aplicações. Elas desempenham um papel crucial na produção de sucos na indústria alimentícia, no tratamento de águas residuais, na extração de óleo cítrico, na indústria de papel e celulose, além de outras aplicações biotecnológicas (EINSCHLAG, 2011).

3.4.1.2 *Lipase*

Catalisam a hidrólise de triglicerídeos aos ácidos graxos correspondentes e glicerol, na interface lipídeo/água (OLIVEIRA, 2007; SHARMA, 2001).

Figura 6 – Reações catalisadas por lipases



Fonte: PAQUES; MACEDO, 2006

Além das reações de hidrólise, as lipases são capazes de catalisar reações de esterificação, transesterificação (alcoólises, acidólises e interesterificação), aminólise (síntese de amidas) e lactonização (SUDBRACK, 2012), conforme Figura 6. Substratos insolúveis em água é um pré-requisito para as lipases se a hidrólise é o objetivo da reação (VORDERWÜLBECKE; KIESLICH; ERDMANN, 1992). As lipases são serina hidrolases e contêm a sequência $X_1\text{-S-X}_2$ como meio catalítico, onde S = serina, X_1 = histidina e X_2 = ácido aspártico ou glutâmico (SUDBRACK, 2012).

A atividade das lipases é baixa em substratos monoméricos, mas logo que um substrato agregado (tal como uma emulsão ou uma solução micelar) é formado, a atividade da lipase aumenta drasticamente. Este fenômeno é chamado de ativação

interfacial. A determinação da estrutura tridimensional de algumas classes de lipases propiciou uma explicação para este fenômeno. O sítio ativo é protegido por superfície entrelaçada, determinada tampa hidrofóbica ou *lid* (KAPOOR; GUPTA, 2012; SUDBRACK, 2012).

Na presença de uma superfície hidrofóbica (tais como gota de óleo), a tampa da lipase se desloca, sofrendo uma mudança conformacional da forma “fechada” da lipase para uma forma “aberta” e permite a interação entre sua face interna hidrofóbica e os resíduos hidrófobos que normalmente circundam o centro ativo da lipase com o substrato (KAPOOR; GUPTA, 2012).

As lipases são encontradas na natureza em ampla escala filogenética, podendo ser obtidas de fontes animais (pancreática, hepática e gástrica), vegetais e também a partir de microrganismos (bactérias e fungos) naturais ou geneticamente modificados. Industrialmente e economicamente, as lipases microbianas apresentam vantagens em relação às lipases de origem animal e vegetal. São em sua maioria extracelulares, resultando em um custo de produção menor, são mais estáveis e possuem propriedades distintas das lipases de origem animal e vegetal.

A alta versatilidade das lipases, considerada como o grupo de biocatalisadores mais importante na biotecnologia, permite uma vasta aplicabilidade em diversos processos, podendo ser usadas na indústria alimentícia, de detergentes, farmacêutica, de couro, têxtil, cosmético e papel (JAEGER; REETZ, 1998; REIS *et al.*, 2009).

3.4.1.3 *Celulase*

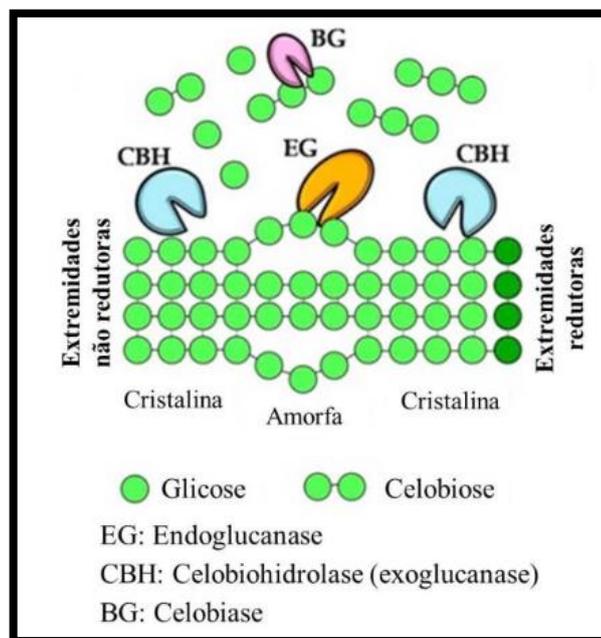
São enzimas específicas para a hidrólise da ligação glicosídica $\beta(1\rightarrow4)$ da celulose (TAN; CAO, 2002). É um sistema enzimático multicomponente composto por uma variedade de enzimas com especificidade e modo de ação distinta, as quais agem de forma sinérgica durante a degradação da celulose. As celulases que atuam no processo de hidrólise são classificadas em: endoglucanases (EG), exoglucanases ou celobiohidrolases (CBH I e CBH II) e celobiase (β G) (CHADEL; SILVA, 2013).

A atuação da celulase pode ser observada a nível molecular na Figura 7. As endoglucanases catalisam aleatoriamente a hidrólise interna da celulose, liberando

celo-oligossacarídeos com diferentes graus de polimerização e celobiose. Em decorrência da hidrólise, originam-se novas cadeias terminais para a ação da exoglucanase. A EG atua somente na porção amorfa da celulose, tendo a sua atividade reduzida com o encurtamento da cadeia de celulose (FURLAN, 2012; SILVA, 2008).

As exoglucanases iniciam a hidrólise nas extremidades da cadeia. A CBHI quebra as unidades de celobiose das extremidades redutoras, enquanto que a CBHII quebra as das extremidades não redutoras (CAVACO-PAULO, 1995).

Figura 7 – Atuação das enzimas componentes da celulase



Fonte: Adaptado de BECHTOLD e SCHIMPER (2010)

A celobiase completa a hidrólise da celulose ao catalisar a hidrólise da celobiose a glicose (VASCONCELOS, 2005). A porção amorfa da celulose é degradada tanto pela endoglucanase quanto pela celobiohidrolase. A porção cristalina, por sua vez, é degradada de forma mais eficiente pela celobiohidrolase (TAN; CAO, 2002).

3.4.2 Combinação de enzimas (*enzymatic pool*) para a biopurga

A atividade enzimática depende da otimização de diferentes fatores como pH, temperatura, concentração dos substratos, tempo, meio reacional, dentre outros que irão governar o processo (FERRARA, SIANI; BON, 2016). Deste modo, entende-se que tais aspectos são importantes para assegurar o rendimento e produtividade da biopurga. Contudo, a estrutura da enzima também deve ser avaliada a fim de compreender como seus componentes podem influenciar a própria atividade enzimática.

Na aplicação de soluções de celulase destaca-se as investigações de processos de pré-tratamento combinados, como se faz notar nos estudos de Hassan e Saifullah (2019). Em suas pesquisas, os autores e seus colaboradores buscaram agrupar a purga e branqueamento em substratos de algodão, um processo de banho único, a partir de banho com mistura de enzimas (protease, xilanase e celulase). Técnicas como índice de alvura, hidrofobicidade, molhabilidade e capacidade de tingimento foram empregadas para avaliação do processo. Desta forma, o desempenho mais adequado foi obtido para banhos 50/50 de protease alcalina e celulase, sendo estes comparados ao método convencional, como também, com outras misturas de enzimas.

Demir *et al.*, (2018) exploraram a utilização de solução de pectinase e pectinase + lipase para biopurga após tratamento de plasma em substratos de algodão. Os ensaios empregando a combinação de enzimas foram realizados em meio ácido (pH 5), temperatura de 50 °C e período de 60 min. Condições distintas dos testes realizados apenas com pectinase, no qual, pH e tempo de processo foram de 6–7 e 30–60 min, respectivamente. Os autores observaram que a remoção de sujidades foi efetiva e que as propriedades esperadas foram impulsionadas utilizando a combinação de tratamento de plasma/enzimas.

Mojsov (2012) apresenta em seus trabalhos que pectinases e celulases podem ser uma combinação possível para a biopurga. Segundo o mesmo autor, em um banho contendo estas enzimas, a pectinase cumpre o papel de degradar a estrutura cuticular do algodão, removendo a pectina e quebrando a ligação entre a cutícula e a fibra. Enquanto isso, a celulase também age degradando a estrutura da cutícula e a parede

primária da celulose. Deste modo, promovendo a remoção de impurezas sobre a superfície fibrosa. Entretanto, o autor salienta que comercialmente, a pectinase é a mais aplicada nos processos fabris.

Em outras investigações, alguns autores citam que além das impurezas tradicionalmente removidas pela purga alcalina, a utilização da combinação de enzimas promove a retirada de outras contaminações sobre a superfície fibrosa (SHAHID *et al.*, 2016; MADHU; CHAKRABORTY, 2017; RAHMAN *et al.*, 2020). No entanto, apesar da combinação enzimática ser uma técnica econômica e alinhada a tecnologias limpas, a compatibilidade entre a enzima no banho pode ser a principal limitação do processo (MADHU; CHAKRABORTY, 2017).

Silva e seus colaboradores (2017) avaliaram a combinação entre pectinase, celulase e lipase, para estudo biotecnológico têxtil do processo sobre duas diferentes condições: adição de agente quelante após o processo enzimático e junto aos componentes químicos durante a preparação do banho. Os autores afirmam que a combinação de enzimas pode ser promissora, no entanto, alertam que há a possibilidade de uma enzima interferir na atividade da outra. Os mesmos indicam que tais influências devem ser investigadas. Porém, obtiveram bons resultados quanto ao grau de alvura e remoção da pectina em banhos contendo as três enzimas, mesmo com a presença de agente quelante adicionado no início do processo.

Neste sentido, entende-se que a combinação de enzimas pode ser uma alternativa para o processo convencional de purga. Bem como, uma nova vertente até mesmo, para a inovação do processo biotecnológico empregando enzimas individuais em banho de pré-tratamento.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão da literatura tornou-se evidente que as biotecnologias têm sido foco importante para o desenvolvimento de métodos alternativos para o pré-tratamento têxtil. Contudo, salienta-se que poucos estudos são direcionados no emprego das enzimas diretamente para a indústria, ou seja, inúmeras pesquisas concentram-se na otimização de processos enzimáticos, buscando insumos e condições adequadas para sua aplicabilidade. Entretanto, há lacunas quanto aos ganhos efetivos em escala industrial.

Neste sentido, o presente trabalho busca investigar e desenvolver a biopurga enzimática, considerando insumos e condições de processo. A fim de ampliar os resultados laboratoriais e avaliar a aplicabilidade do método biotecnológico em escala industrial.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais utilizados nos processos de tratamento de malha crua, biopurga e purga convencional, e na avaliação da malha tratada, incluindo os reagentes e equipamentos empregados. Os experimentos foram realizados nos Laboratórios de Beneficiamento (LABENE) e Fibras e Fiação (LAFIF) do Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade Federal de Santa Catarina, além do Laboratório de Beneficiamento Têxtil (LBT) da empresa.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Substrato Têxtil

Malha Jersey 100% algodão, disponibilizada pela Cia Hering®. A caracterização desta malha é apresentada pela Tabela 2, que foi realizada pelo Laboratório de Beneficiamento Têxtil da empresa, localizada em Blumenau (Santa Catarina). As amostras de malha utilizadas nos ensaios deste trabalho são oriundas de um mesmo lote de fio 30/1 Open End 100% algodão, de modo a garantir a padronização dos corpos de prova quanto ao tipo de fio, gramatura, cor e hidrofiliidade.

Tabela 2 – Caracterização do substrato têxtil

Ensaio	Norma	Resultado
Composição	ABNT NBR 11914	100% algodão
Gramatura [g/m ²]	ABNT NBR 10591	158,5
Título [Ne]	ABNT NBR 13216	29,27
		CV%*: 4,55
Hidrofiliidade [s]	ABNT NBR 13000	Maior que 5 min

* Coeficiente de Variação

4.1.2 Enzimas

Foram utilizadas três enzimas, sendo estas: pectinase, lipase e celulase, fornecidas pela Akmey Biotecnologia Têxtil, localizada no município de Indaial (Santa Catarina). Seleccionadas conforme recomendação da empresa fornecedora frente ao processo que se objetiva estudar, as características fornecidas são apontadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características das enzimas

Enzima	Celulase	Lipase	Pectinase
Origem	<i>Bacillus licheniformis</i>	<i>Thermomyces lanuginosus</i>	<i>Aspergillus oryzae</i>
pH	4,5 – 6,5	5,0 – 7,0	4,5 – 6,5
Temperatura	50 – 65 °C	40 – 60 °C	50 – 65 °C

Fonte: Akmey (2024)

4.1.3 Corante

Utilizou-se o corante reativo, ao qual apresenta alta solubilidade em água e estabelece uma ligação covalente entre o corante e a fibra, garantindo uma melhor estabilidade na cor do tecido tingido. Classificado de acordo com sua estrutura química (azo), de nome comercial Ovefix K-DS (preto), fornecido pela empresa *Ouro Verde Chemicals*, apresenta *Color Index* (CI) de 77499. O mesmo foi utilizado como forma de avaliação de preparação da malha, devido a representar cerca de 30% da produção da empresa.

4.1.4 Reagentes

Nos processos de tratamento de malha crua, tingimento e ensaboamento foram utilizados os produtos apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Produtos utilizados na preparação, tingimento e ensaboamento

Reagente	Função
Surfactante sustentável (QI ORG II)	Alternativa aos detergentes (sabões) convencionais
Hidróxido de sódio	Retira as ceras naturais do algodão
Sequestrante (Ekonova CP 4780)	Extrai cálcio e magnésio do banho
Ácido acético (Ekonova T1402)	Neutraliza o pH do banho
Fixador (Ekonova Laufix)	Fixa o corante na fibra e melhora a solidez
Carbonato de sódio (Sodasolvay)	Altera o pH do banho, de modo que o corante reaja com a fibra, fazendo uma conexão permanente que mantém o corante na fibra
Cloreto de sódio (Refisa)	Ao adicionar (eletrólito) no banho de tingimento o corante perde mobilidade e desloca-se para o interior da fibra

Fonte: O autor (2024)

O agente QI ORG II é de origem renovável, composto por tensoativos aniônicos/não-iônicos a base de alcoóis etoxilados e óleo de casca de laranja. Algumas de suas características são pH de trabalho entre 5,5 e 7,5, densidade 1 a 1,5 g/cm³ e concentração micelar de 0,78 g/L.

4.1.5 Equipamentos

No decorrer deste trabalho foram utilizados o pHmetro modelo PHS – 3E, marca Even, para aferir o pH; balança analítica modelo AB204-S, marca Even, para realizar a pesagem dos reagentes; espectrofotômetro visível modelo DC 500, marca Datacolor, para as determinações colorimétricas e grau de alvura após o pré-tratamento/tingimento; aparelho de beneficiamento por esgotamento HT IR Dyer TC 2200, marca *Tex Control*, para os ensaios de pré-tratamento alcalino e enzimático de malha crua, bem como para o processo de tingimento. Nos ensaios de perda de massa utilizou-se a estufa de circulação de ar DZ47 - 63, marca Lucadema.

4.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.2.1 Estudo das Preparações Enzimáticas

4.2.1.1 *Determinação da atividade enzimática da pectinase*

Sob a ação da pectinase, a pectina contém em sua cadeia regiões onde o ácido galacturônico é substituído por açúcares redutores. Mensurando o aumento de açúcares redutores existentes no meio, foi estabelecido a atividade da enzima.

Em um tubo de ensaio, 100 µL de solução da enzima foi incubada a 55 °C juntamente com 900 µL de 0,25% (p/v) de pectina, 20 mM de NaCl e 0,1 mM de CaCl₂ em tampão fosfato 0,05 M pH 7,0 no tempo de 5 minutos. Posteriormente adicionou-se 1 mL de DNS e a solução foi fervida por 10 minutos e após resfriada. Se necessário, a solução é diluída em água destilada, e a absorvância foi lida em 540 nm. As amostras de branco foram feitas com volume de solução tampão correspondente ao da enzima nas amostras.

A quantidade de enzima que é preciso para produzir 1 µmol de açúcar redutor por minuto foi definida como uma unidade de atividade (U). A atividade pectinolítica foi determinada pela Equação 1, expressa em U/mL ou µmol/mL.min.

$$A = \frac{[C] \cdot V_T \cdot D_E}{t \cdot V_E} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

A = atividade enzimática (U/mL)

C = concentração de açúcar redutor liberado ($\mu\text{mol/mL}$)

V_T = volume total da solução (mL)

D_E = diluição da enzima (adimensional)

t = tempo de reação (min)

V_E = volume da solução de enzima (mL)

4.2.1.2 *Determinação da atividade enzimática da lipase*

A atividade enzimática da lipase foi determinada e realizada através do método de Chiou e Wu (2004). Baseia-se na hidrólise do p-nitrofenilpalmitato (pNPP) para o p-nitrofenol, ($\epsilon = 15.000 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$, como coeficiente de extinção molar), cuja liberação proporciona o aumento na absorvância em 410 nm.

A substância enzimática utilizada foi uma solução de pNPP 0,5% (massa/volume) em álcool etílico absoluto. A combinação foi composta por 100 μL de lipase, 1000 μL de solução pNPP e 1000 μL de tampão Tris-HCl pH 8,0, incubada a 37 °C durante 5 minutos dentro de outro recipiente com água fervente. A reação de hidrólise enzimática do pNPP foi finalizada por intermédio da adição de 2000 μL de uma solução 0,5 N de carbonato de sódio. Após, foram retirados 2000 μL desta solução sendo centrifugados durante 10 minutos em 10.000 rpm. O sobrenadante, 200 μL , foi diluído em água destilada e submetido à análise espectrofotométrica. Uma unidade de atividade enzimática (U) foi determinada como a quantidade de enzima necessária para hidrolisar 1 μmol de pNPP por minuto. A atividade lipolítica foi determinada pela Equação 2, expressa em U/mL ou $\mu\text{mol/mL}\cdot\text{min}$.

$$A = \frac{Abs \cdot D \cdot 1000}{d \cdot \epsilon \cdot t} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

A_{bs} = absorvância

D = diluição final

d = caminho óptico (cm)

D_E = diluição da enzima (adimensional)

ε = coeficiente de extinção molar (L/mol.cm)

t = tempo de reação (min)

4.2.1.3 *Determinação da atividade enzimática da celulase*

É possível efetuar a deterioração do polímero de celulose com a atuação de uma das enzimas multicomponentes (EG, CBH e β G) que atuam em coletivo. A determinação da atividade enzimática da enzima celulase foi executada para a atividade celulolítica da endoglucanase (EG) mensurando a quantificação dos açúcares redutores. Com os interferentes produzidos no decorrer da reação com o substrato, realizou-se em paralelo provas em branco.

O princípio de Ghose (1987), com algumas alterações, foi aplicado para a determinação da atividade celulolítica da endo $\beta(1,4)$ -glucanase ou carboximetilcelulase. A substância empregada foi uma solução de carboximetilcelulose 4% (massa/volume) em tampão fosfato 0,05 M, pH 6,0.

A combinação da reação foi constituída de 100 μ L de enzima e 900 μ L da solução de substrato, incubou-se a mistura a 55 °C, sob agitação, ao longo de 30 minutos. Posteriormente ao tempo de reação, foi adicionado 1,5 mL do reagente DNS e feito à fervura durante 5 minutos. Em seguida, a amostra é resfriada em banho de gelo e, se necessário, dissolvida até permitir a medição da absorvância.

A quantidade de enzima capaz de hidrolisar a liberação de 1 μ mol de açúcar redutor por minuto foi definido como uma unidade de atividade (U). A atividade celulolítica foi estabelecido pela Equação 3, expressa em U/mL ou μ mol/mL.min.

$$A = \frac{[C] \cdot V_T \cdot D_E}{t \cdot V_E} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

A = atividade enzimática (U/mL)

C = concentração de açúcar redutor liberado ($\mu\text{mol/mL}$)

V_T = volume total da solução (mL)

D_E = diluição da enzima (adimensional)

t = tempo de reação (min)

V_E = volume da solução de enzima (mL)

4.2.1.4 *Análise da influência do agente surfactante na atividade das enzimas*

O processo experimental compreendeu a análise da atividade das enzimas pectinase, lipase e celulase nas mesmas condições observadas durante o processo de biopurga. Conforme o planejamento experimental apresentado no item 4.3, as enzimas, em suas condições máximas, foram incubadas em tampão pH 6,5 a 55 °C. Adicionou-se o QI ORG II na concentração utilizada no processo de biopurga (1,0 g/L) e foram retiradas frações nos tempos de 0, 10, 35 e 60 minutos, avaliando-se a atividade das enzimas de acordo com os itens 4.2.1.1, 4.2.1.2 e 4.2.1.3. Para comparar as atividades, o procedimento foi realizado da mesma forma, mas sem a adição do surfactante.

4.2.2 Tratamento Prévio da Malha de Algodão

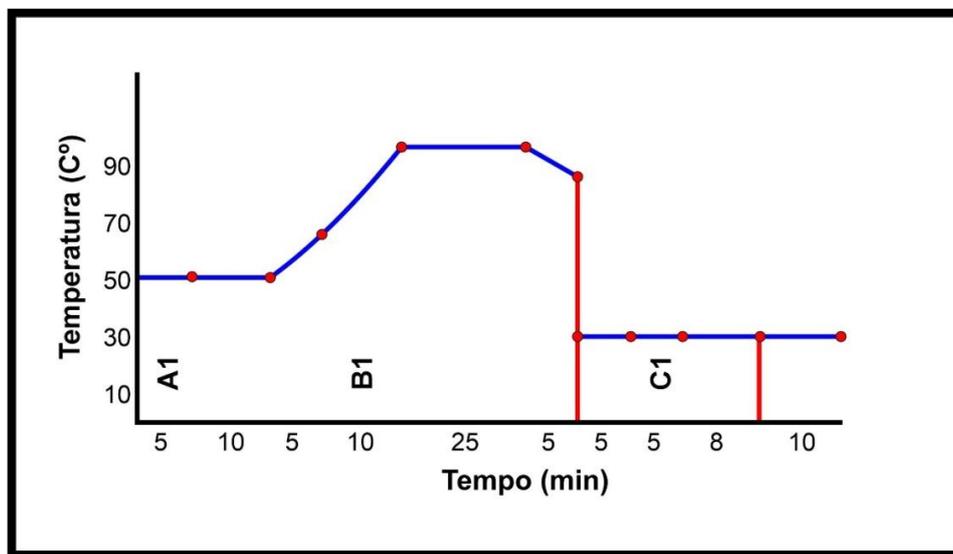
Para referência na avaliação da biopurga, uma amostra foi manuseada com purga alcalina. Os ensaios foram realizados no equipamento HT IR Dyer TC 2200, marca *Tex Control*, do Laboratório de Beneficiamento Têxtil da organização.

4.2.2.1 *Purga Alcalina*

Realizada com base no processo de purga convencional da Cia Hering®, para posterior tingimento da malha. Ajustes foram feitos para a adaptação da metodologia aos equipamentos disponíveis em laboratório. O perfil deste processo para malha de algodão, com relação de banho (RB) de 1:8 e pH 6,5, está apresentado na Figura 8.

O QI ORG II (1,0 g/L) [A1] e o hidróxido de sódio 50 °Be (2,0 g/L) [B1] foram dosados a 50 e 60 °C, respectivamente, com subsequente aquecimento a 95 °C, temperatura a qual se mantêm durante 25 min. Posteriormente, o banho é descartado e a malha passa por uma neutralização com ácido acético (0,8 g/L) [C1] para pH 6,5 a 30 °C por 13 min. Uma lavagem ainda é feita na mesma temperatura por 10 min.

Figura 8 – Gráfico do processo de purga alcalina



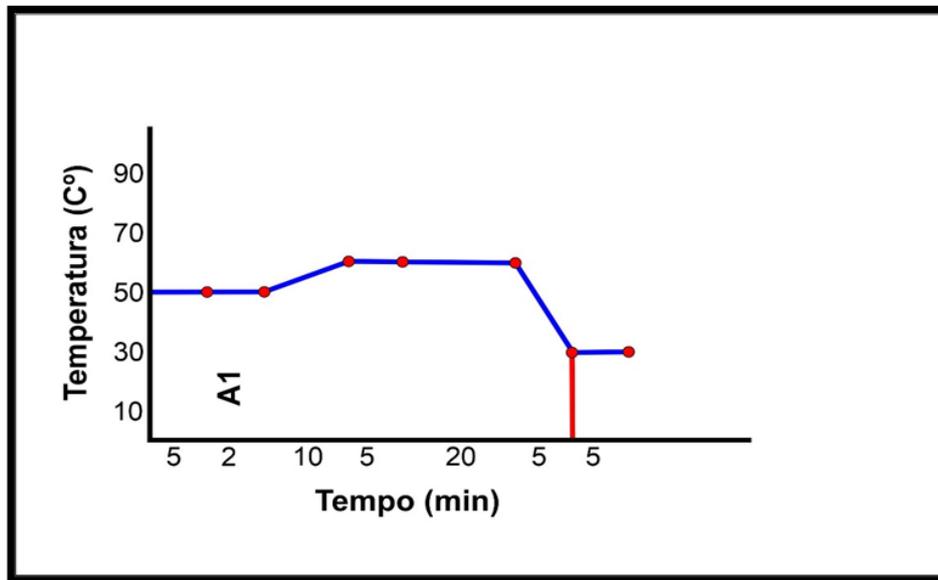
Fonte: O autor (2024)

4.2.2.2 Purga Enzimática

As amostras foram submetidas a processos distintos, sendo: (I) *all in*, com a adição do QI ORG II junto aos outros agentes químicos no início do processo; (II) com a adição do surfactante somente após 30 min de reação. Ambos os processos foram executados com uma relação de banho (RB) 1:8 e pH 6,5, controlado com tampão.

A representação do processo I está presente na Figura 9. O banho composto pelo QI ORG II (1,0 g/L), pelo tampão e pelas enzimas, junto com o corpo de prova é elevado à temperatura de 55 °C, na qual permanece por 40 min. Ao término, o banho é descartado e o corpo de prova passa por uma lavagem com água a 30 °C por 5 min. Já o processo II segue o mesmo perfil do processo anterior, porém com a adição do surfactante após 30 min de processo.

Figura 9 – Gráfico do processo de biopurga para o processo *all-in*



Fonte: O autor (2024)

4.2.3. Avaliação da Malha Tratada

Os corpos de prova sem tratamento e tratados, foram caracterizados quanto à hidrofiliidade, perda de massa e grau de alvura. Foram realizados ensaios ao tingimento com determinação de cor e a solidez a lavagem do artigo. Posteriormente, com a obtenção do melhor resultado, foi realizado a reprodutibilidade em máquina piloto de produção.

4.2.3.1. Hidrofiliidade

Adequado à norma ABNT NBR 13.000, determina o tempo necessário que uma gota de água (25 ± 2 °C) utiliza para ser absorvida pela malha. O tempo de formação da gota deve ser de 5 segundos. A medição do tempo foi acionada no momento em que a gota tocou a malha e cessada quando a água foi absorvida. O resultado foi à média de três ensaios consecutivos, tanto nas laterais como no centro do tecido.

4.2.3.2. *Perda de massa*

Para determinação da perda de massa dos corpos-de-prova, foram pesadas as amostras antes e após os processos de purga, convencional e biotecnológico. Assim, seguindo a metodologia adaptada de investigações anteriores, após o pré-tratamento, as amostras foram secas em estufa em torno de 100 °C, durante período de 30 min. Após isso, os corpos-de-prova foram pesados temperatura ambiente. A Equação 4 serviu de base de cálculo para a perda de massa em porcentagem (ALY; MOUSTAFA; HEBEISH, 2004; YAN *et al.*, 2009; SILVA, 2013).

$$\text{Perda de Massa (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

W_1 = massa do corpo de prova antes do tratamento;

W_2 = massa do corpo de prova após o tratamento;

4.2.3.3. *Grau de alvura*

Outro parâmetro de análise é o grau de alvura das amostras. Para tanto, a avaliação seguiu a partir da metodologia proposta por Ly e colaboradores (2020). Conforme os autores, o grau de alvura das amostras pré-tratadas em purga alcalina e enzimática, são avaliadas com o auxílio de um espectrofotômetro, modelo DC 500, marca Datacolor, usando cerâmica branca como padrão de calibração do Laboratório de Beneficiamento Têxtil.

4.2.3.4. *Caracterização do comportamento tintorial*

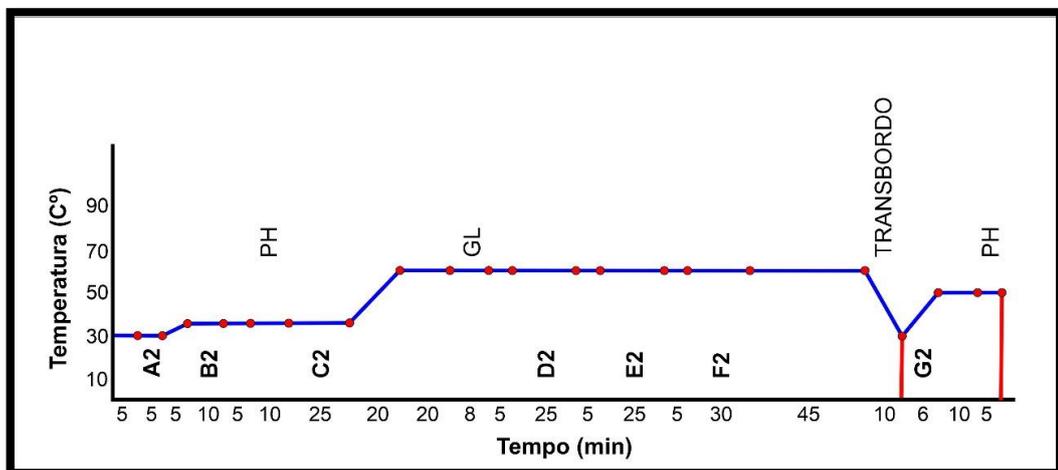
A quantificação da cor foi realizada através do método CIELab, que fornece valores numéricos do espaço de cor L^* , a^* , b^* , C^* , H^* e suas respectivas diferenças em deltas (Berns, 2000). O autor explica que a quantificação de cor pode ser realizada por meio do método CIELAB, no qual, organiza-se em um espaço tridimensional conforme as coordenadas L^* , a^* e b^* que indicam: luminância (0, preto e 100, branco);

tendência entre verde (negativo) e vermelho (positivo); azul (negativo) e amarelo (positivo), respectivamente. Assim, a partir das amostras pré-tratadas e o padrão de referência, pode-se determinar a diferença de cor (ΔE^*ab) que equivale à distância entre duas amostras em análise, considerando o espaço tridimensional (LY *et al.*, 2020). As coordenadas C e H são definidas como: C a saturação, que é a distância radial do centro do espaço até o ponto da cor, e H o ângulo total dentro do espaço $L^*C^*H^*$.

4.2.3.4.1. Tingimento

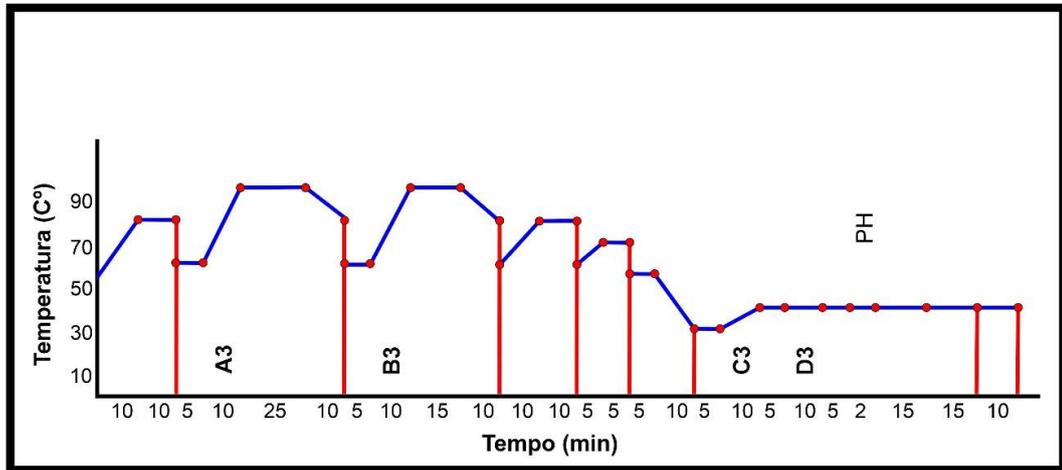
O tingimento realizado representa o processo desenvolvido pela Cia Hering®. Este processo está explícito na Figura 10 e na Figura 11, sendo, respectivamente, o procedimento de tingimento e ensaboamento. Os tingimentos foram realizados em triplicata.

Figura 10 – Processo de tingimento



Fonte: O autor (2024)

Figura 11 – Processo de ensaboamento



Fonte: O autor (2024)

Os corpos-de-prova tratados pelos processos de purga alcalina e enzimática foram submetidos a um tingimento padrão com o corante reativo Ovefix K-DS (cor preto). Após o tingimento foi avaliado com o espectrofotômetro, de acordo com o método CIELab. Os reagentes utilizados e suas concentrações estão especificados na Tabela 4 e 5, sendo que cada letra representa a adição do reagente respectivo no tempo determinado.

Tabela 4 – Reagentes empregues no tingimento

Sequência	Reagente	Concentração
A2	QI ORG II	3,0 g/L
	Ekonova CP 4780	2,5 g/L
B2	Cloreto de sódio	90,0 g/L
	Carbonato de sódio	0,7 g/L
C2	Corante Ovefix K-DS	3%
D2	Carbonato de sódio	1,5 g/L
E2	Carbonato de sódio	3,5 g/L

F2	Hidróxido de sódio	2,0 g/L
G2	Ekonova T1402	1,2 g/L

Fonte: O autor (2024)

Tabela 5 – Reagentes utilizados no ensaboamento

Sequência	Reagente	Concentração
A3	QI ORG II	3,0 g/L
B3	QI ORG II	3,0 g/L
C3	Ekonova T1402	0,2 g/L
D3	Ekonova Laufix	3,0 g/L

Fonte: O autor (2024)

4.2.3.5. Solidez à lavagem

A metodologia empregada para a análise de solidez da cor à lavagem baseou-se na norma ABNT NBR ISO 105-C10, realizado no Laboratório de Beneficiamento Têxtil da Cia Hering®, no qual, visa determinar a resistência da cor após o tingimento de têxteis a lavagem com dispersante (5 g/L) e carbonato de sódio (2 g/L). Durante a mesma etapa um tecido testemunha de 100% algodão foi adicionado junto com a amostra em estudo (Figura 12).

O procedimento empregou canecos em metal, em equipamento WT, marca Mathis. As condições de processo seguiram a indicações da norma. Após isso, a cor das amostras foi avaliada com base na escala de cinza, no intuito de verificar a solidez da cor após a lavagem. O resultado é obtido conforme a atribuição de notas entre 1-5, onde o menor valor é dado para baixa solidez e o maior para alta solidez (SILVA, 2013).

Figura 12 – Procedimentos de ensaio de solidez a cor à lavagem



Fonte: O autor (2024)

4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL ESTATÍSTICO

Um planejamento estatístico foi desenvolvido para auxiliar no estudo da determinação do melhor “*pool enzimático*” no tratamento de preparação da malha crua. O planejamento é do tipo fatorial completo 2^3 com teste no ponto central. Todos os pontos foram avaliados em triplicata, totalizando 27 ensaios.

O planejamento está baseado na atividade de cada enzima em relação à massa de substrato têxtil, no caso a malha de algodão. Os valores máximos foram determinados com base na recomendação do fabricante, com um acréscimo percentual para se obter uma faixa mais ampla de estudo. Já os valores mínimos são referentes a ausência da enzima no processo, resultando em zero de atividade da respectiva enzima.

Os valores das atividades são referentes às medidas realizadas nas condições recomendadas para cada enzima e somente para a principal atividades do caldo enzimático.

Tabela 6 – Valores das atividades máximas, mínimas e médias das variáveis independentes do planejamento estatístico

Variáveis Independentes	Níveis		
	-1	0	1
Atividade Pectinase (U/g)	0	0,442	0,871
Atividade Lipase (U/g)	0	0,121	0,229
Atividade Celulase (U/g)	0	1,789	3,577

Fonte: O autor (2024)

A equação do modelo matemático para prever a respostas foi dada pela Equação 5.

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde y é a variável resposta, b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{13} , b_{23} e b_{123} são os coeficientes de regressão, sendo b_0 o termo de interceptação e os demais os termos lineares. Já x_1 , x_2 e x_3 são as variáveis independentes e x_{12} , x_{13} , x_{23} e x_{123} suas interações. Na análise do planejamento foi utilizado um pacote computacional STATISTICA versão 7.0.

4.4 ENSAIO PILOTO

Com a determinação do melhor resultado, foi realizado a reprodutibilidade em máquina piloto, com capacidade para 50 kg. O processo (biopreparação + tingimento + ensaboamento) foi realizado por esgotamento, ao qual é levada em consideração a relação entre a quantidade de malha e o volume de banho. Realizado em batelada, o equipamento utilizado foi o HT 3000, da marca Teixeira, conforme apresentado na Figura 13.

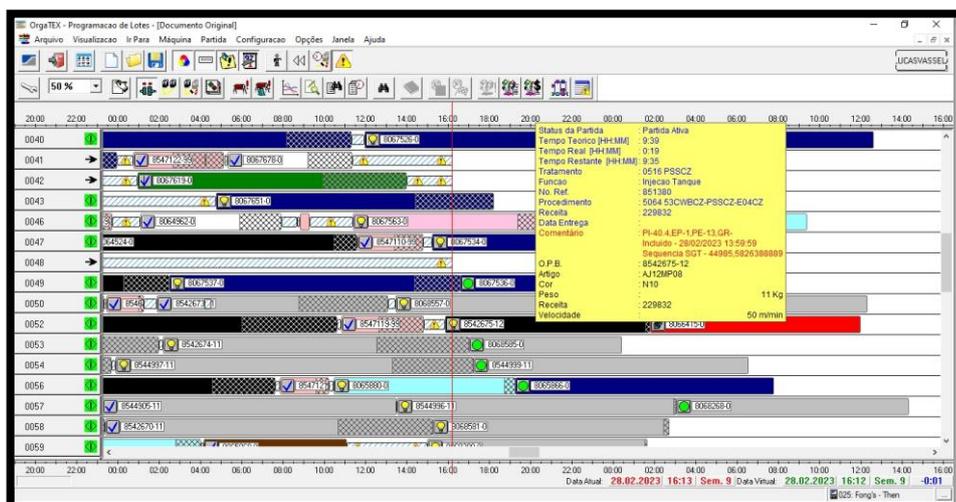
Figura 13 – Ensaio piloto



Fonte: O autor (2024)

Já o sistema para a programação e monitorização online dos controladores SECOM da máquina de tingir é o *Single User Orgatex Basic*, conforme Figura 14. Através deste, é possível acompanhar o andamento da partida, em qual etapa a mesma se encontra e se há algum tipo de interferência durante o processo.

Figura 14 – Programação do lote em sistema



Fonte: O autor (2024)

A Figura 15 apresenta o fluxograma do procedimento operacional realizado para este trabalho. Inicialmente, os lotes foram programados no sistema Orgatex, em seguida, realizou-se a dissolução do corante e pesagem dos auxiliares (cloreto e carbonato de sódio). Posteriormente já presente no local da máquina de tingimento se iniciou o programa e carregou-se a malha crua. Os processos realizados: preparação, tingimento, ensaboamento e enxágue. Por fim, finalizou-se o programa e a descarga do lote para dar sequência ao processo de acabamento.

Figura 15 – Fluxograma para o procedimento operacional



Fonte: O autor (2024)

4.4.1 Análise econômica

Foi analisado o custo total do processo, como o valor dos insumos, água e tempo de máquina, já que uma etapa que é realizada a 95°C passa a ser feita a 55°C e, portanto, irá precisar de um tempo menor para atingir o patamar estipulado. Para a preparação, o custo é obtido pela Equação 6, com base em valores e concentrações dos químicos utilizados em cada processo, a fim de comparar a diferença entre os mesmos.

$$\text{Custo de preparação} = (\text{custo químico} + \text{custo água} + \text{custo tempo}) \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo que:

$$\text{Custo químico} = \left(\frac{\text{custo}}{\text{kg}} \text{ insumo} \times \frac{\text{consumo}}{\text{kg}} \right)_{n+1} \quad (\text{Equação 7})$$

$$\text{Custo água} = \left(\frac{\text{custo}}{\text{m}^3} \text{ ETA} + \frac{\text{custo}}{\text{m}^3} \text{ ETE} \right) \times \frac{\text{consumo de água}}{\text{m}^3} \quad (\text{Equação 8})$$

$$\text{Custo tempo} = \left(\frac{\text{custo máquina}}{\text{min}} \times \text{tempo de processo} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

O custo total de uma partida é o mesmo obtido pela Equação 6, porém, além dos custos dos químicos, água e tempo de processo de preparação, são adicionados os das etapas de tingimento e ensaboamento. Em seguida, para simularmos o ganho em capacidade produtiva entre os processos, considera-se uma produção trabalhando 24 horas por dia, durante 25 dias, sendo obtida pela Equação 10.

$$\text{Capacidade produtiva diária/máquina} = \left(24 \text{ horas} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} / \text{tempo de processo} \right) \quad (\text{Equação 10})$$

Obtêm-se, portanto, o número de partidas por máquina e por turno de ambos os processos. Além disto, atualmente a empresa disponibiliza 75 máquinas com capacidade de 5 kg à 1200 kg. A média diária de máquinas que rodam cores escuras,

ou seja, as que realizam o processo de purga são 25 máquinas/turno. Como base de cálculo podem-se considerar essas 25 máquinas/dia com uma média de 600 kg de malha por partida, deste modo, obtêm-se o valor em toneladas (T)/dia, conforme a Equação 11.

$$\text{Volume de produção} = \frac{N \text{ de máquinas}}{\text{dia}} \times \frac{N \text{ de partidas}}{\text{turno}} \times \text{capacidade da máquina (kg)}$$

(Equação 11)

A fim de determinar a receita bruta (Equação 12), é necessário multiplicar o valor do preço dos produtos pela quantidade de bens vendidos, neste caso, a quantidade em toneladas de malha. A empresa recebe dos seus clientes em média R\$ 13,30/kg.

$$\text{Receita bruta} = \frac{\text{preço}}{\text{kg}} \times \frac{\text{toneladas}}{\text{dia}}$$

(Equação 12)

Para comparar se o aumento da receita bruta entre os processos reflete também no acréscimo do lucro líquido, o mesmo é realizado pela Equação 13.

$$\text{Lucro} = \text{receita bruta} + \text{custo total}$$

(Equação 13)

Desta forma, verificar se este novo processo é economicamente viável e irá gerar ganhos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será relatado e abordado os resultados experimentais pertinente ao estudo das enzimas pectinase, lipase e celulase, na preparação de malha crua e para o estágio de tingimento, seguindo-se a metodologia desenvolvida no Capítulo 4.

5.1 CARACTERIZAÇÃO ENZIMÁTICA

As enzimas pectinase, lipase e celulase foram caracterizadas quanto a sua atividade nas condições recomendadas pela empresa fornecedora e nas condições do processo de biopurga. Também foi analisada a influência do surfactante na atividade das enzimas.

5.1.1 Determinação das atividades enzimáticas

As preparações enzimáticas comerciais foram caracterizadas, em suas condições recomendadas de pH e temperatura, conforme os itens 4.2.1.1, 4.2.1.2 e 4.2.1.3, para a atividade pectinolítica, lipolítica e celulolítica, respectivamente. Os valores obtidos estão expostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Atividade principal e secundário dos caldos enzimáticos

Caldo enzimático	Níveis		
	Pectinolítica (Uc/mL)	Lipolítica (UL/mL)	Celulolítica (UP/mL)
Pectinase (U/g)	577,81 ± 10,8	-	2,08 ± 0,2
Lipase (U/g)	52,39 ± 6,6	33,17 ± 1,2	0,97 ± 0,1
Celulase (U/g)	105,22 ± 2,1	-	1556,2 ± 20,7

Fonte: O autor (2024)

A empresa fornecedora afirma que a pectinase possui atividade pectinolítica, lipase atividade lipolítica e celulase atividade celulolítica. No entanto, os valores de atividade fornecidos pela empresa não podem ser comparados com os obtidos neste trabalho, devido às diferentes metodologias utilizadas. Além disso, as informações oferecidas pela empresa são incompletas, pois, conforme observado na Tabela 7, as preparações enzimáticas apresentam atividades secundárias de natureza pectinolítica e celulolítica, mas não apresentam atividade secundária de natureza lipolítica.

Contudo, a atividade enzimática principal declarada para cada preparação se mostra muito mais forte do que nos caldos cuja presença desta atividade não foi informada. A preparação celulase, por exemplo, apresenta uma atividade celulolítica de $1556,2 \pm 20,7$, enquanto que os outros dois caldos enzimáticos não apresentam nem 0,19% desta atividade. Já a atividade pectinolítica apresenta-se, relativamente, um pouco mais forte nos caldos em que esta atividade não é declarada, porém, ainda muito menos do que o encontrado na pectinase. A atividade específica destas enzimas, está explicitada na Tabela 8.

Tabela 8 – Atividade específica das enzimas

Enzima	Atividade Específica (U/mg)
Pectinase (U/g)	$17,16 \pm 0,04$
Lipase (U/g)	$1,37 \pm 0,09$
Celulase (U/g)	$4861,18 \pm 309,87$

Fonte: O autor (2024)

A celulase possui a maior atividade específica encontrada, $4861,18 \pm 309,87$ U/mg. Ferreira (2012) investigou a atividade de endoglucanases de diferentes preparações enzimáticas de celulases e identificou variadas atividades específicas, sendo que a mais alta encontrada não representa 1,5% da preparação de celulase, comprovando que esta é realmente uma preparação com elevada atividade específica, conforme indicado pela empresa fornecedora. Já a pectinase apresentou uma atividade específica de $17,16 \pm 0,04$ U/mg. Isso ocorre, pois apesar de ser utilizada a mesma metodologia, os valores de pH e temperatura nos quais a atividade

foi verificada se distinguem, sendo que Kalantzi *et al.*, (2010) mensuraram a atividade em pH 9,5 e a 30 °C.

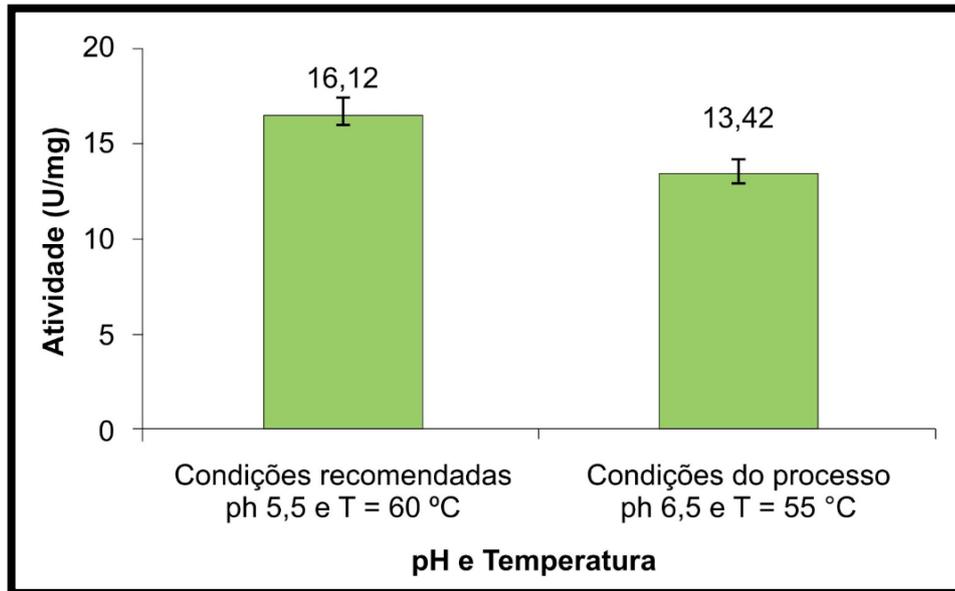
5.1.1.1 *Atividade observada nas condições do processo enzimático*

As faixas dos valores recomendados para pH e temperatura e dos valores de processo informados pela empresa fornecedora das enzimas, assim como os observados na literatura para a aplicação de enzimas no processo de biopurga, concluiu-se que o meio reacional do processo teria pH 6,5 e temperatura de 55 °C.

Como os valores de pH e temperatura do processo diferem dos valores recomendados para as enzimas, foi avaliada a atividade destas nas condições do processo e comparada com o valor obtido nas condições recomendadas pela empresa fornecedora. As atividades podem ser observadas nos gráficos expostos na Figura 16, 17 e 18.

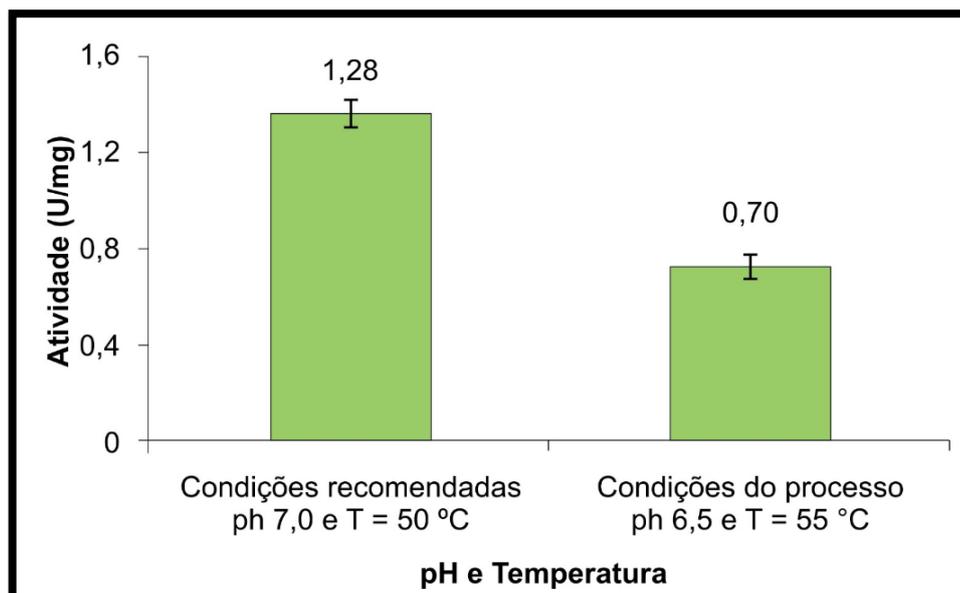
A pectinase teve uma redução de 16,74% em sua atividade, atribuída ao pH mais baixo do processo. Já a lipase apresentou uma redução de 45,31% em sua atividade, a maior variação encontrada. Isso ocorre porque, tanto em temperatura quanto em pH, as condições recomendadas para a enzima estão distantes das estabelecidas no processo enzimático. A celulase foi a única enzima que não apresentou variação significativa em sua atividade, considerando o desvio padrão. Esse comportamento já era esperado, pois as condições de processo da celulase são as mais próximas às suas condições recomendadas. A pequena diferença está relacionada ao pH, mas dentro desse intervalo, conforme as informações do fornecedor, a atividade pode ser considerada de mesma ordem de magnitude.

Figura 16 – Comparação da atividade pectinolítica da preparação da enzima pectinase nas condições recomendadas e nas do processo de biopurga



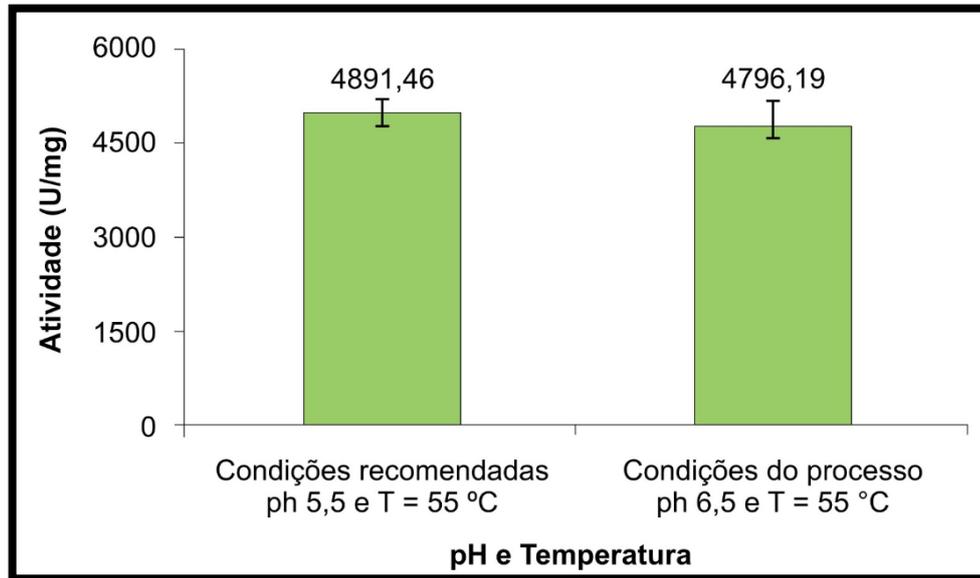
Fonte: O autor (2024)

Figura 17 – Comparação da atividade lipolítica da preparação da enzima lipase nas condições recomendadas e nas do processo de biopurga



Fonte: O autor (2024)

Figura 18 – Comparação da atividade celulolítica da preparação da enzima celulase nas condições recomendadas e nas do processo de biopurga



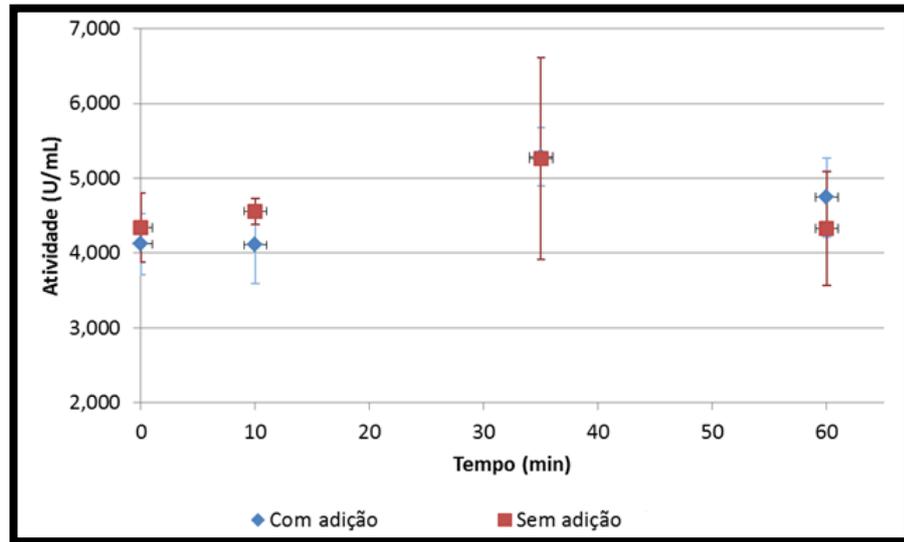
Fonte: O autor (2024)

A verificação das diminuições das atividades abre a discussão para a otimização do processo em relação aos fatores pH e temperatura. Um estudo para determinar esses fatores pode resultar em um processo mais eficiente. No entanto, a avaliação não deve ser vinculada apenas à atividade das enzimas, mas sim às características exigidas da malha tratada. Ao ajustar o pH e a temperatura, pode-se favorecer uma única enzima, que pode ser a principal no processo de biopurga, ou pode-se estabelecer um valor que favoreça a ação conjunta das três enzimas.

5.1.2 Avaliação da influência do sequestrante na atividade das enzimas

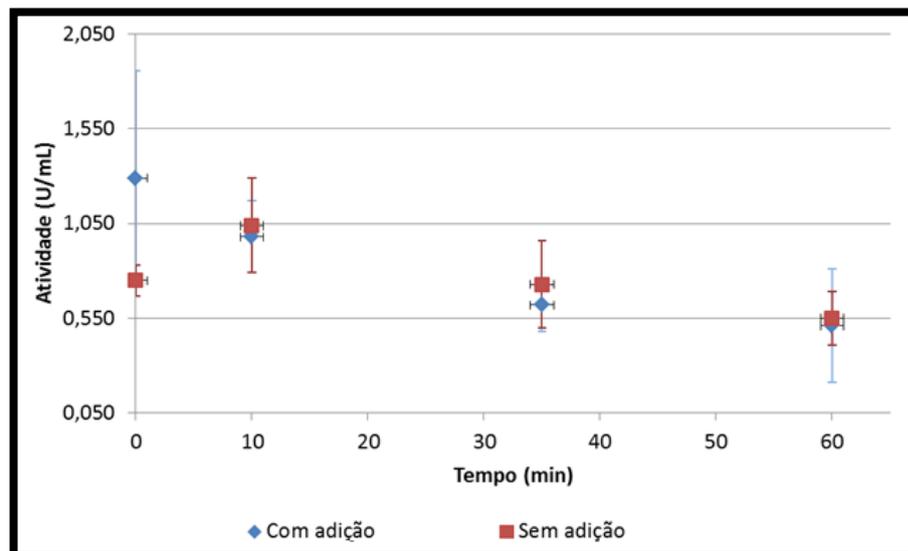
Com o intuito de avaliar esta influência foram realizados ensaios experimentais conforme o item 4.2.1.4, e os resultados obtidos estão expostos nas Figura 19, 20 e 21. Todos os ensaios foram realizados em temperatura 55 °C e pH 6,5.

Figura 19 – Comparação da atividade pectinolítica da preparação da enzima pectinase na presença de surfactante e na ausência do mesmo



Fonte: O autor (2024)

Figura 20 – Comparação da atividade lipolítica da preparação da enzima lipase na presença de surfactante e na ausência do mesmo

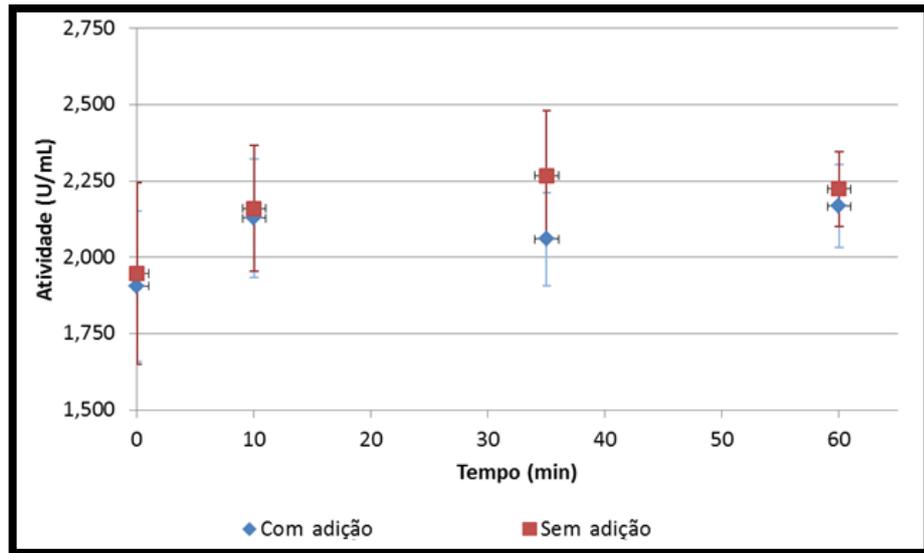


Fonte: O autor (2024)

Para as enzimas pectinase e lipase, a presença de surfactante às vezes acarretou atividade superior à observada na ausência do mesmo e, outras vezes, apresentou atividade inferior. Com base nesse fato, aliado ao desvio padrão, não é

possível afirmar que o surfactante influencie as atividades dessas enzimas.

Figura 21 – Comparação da atividade celulolítica da preparação da enzima celulose na presença de surfactante e na ausência do mesmo



Fonte: O autor (2024)

Observa-se que a atividade da enzima celulase parece ter a tendência a ser inferior na presença do surfactante, principalmente aos 35 min. Porém, considerando-se o desvio padrão do experimento, nada pode se afirmar acerca da influência do surfactante sobre a atividade da celulase, uma vez que os desvios sobrepõem-se uns aos outros.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MALHAS TRATADAS

O processo de preparação enzimática, foi avaliado pela influência do surfactante em seu resultado final e, após a definição do melhor processo, se com adição no início ou após 30 min de reação, foi avaliada a influência das enzimas pectinase, lipase e celulase no processo.

A avaliação foi feita com o auxílio de um planejamento experimental e a caracterização da malha tratada. Essa caracterização também foi realizada na malha submetida ao processo de purga convencional, a fim de se comparar este processo com o enzimático.

5.2.1 Avaliação da influência do surfactante nas características posteriores ao tratamento enzimático

A malha crua foi tratada pelos processos de biopurga detalhados no item 4.2.2.2. Logo, os distintos procedimentos, (I) adição de surfactante no início do processo, (II) adição do surfactante após 30 min de reação, foram avaliados através da caracterização das malhas tratadas de acordo com as metodologias explicitadas no item 4.2.3. Todas as caracterizações foram feitas pelo menos em triplicata e os resultados obtidos estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparação entre os resultados dos processos de lavagem enzimática com a adição de surfactante no início do procedimento e com a adição após 30 min de reação

Caracterização	Biopurga com adição do surfactante no início do processo (I)	Biopurga com adição do surfactante após 30 min de reação (II)
Hidrofilidade (s)	14,69 ± 2,47	15,71 ± 2,64
Perda de massa (%)	7,12 ± 0,13	6,76 ± 0,09
Grau de alvura (°C Berger)	24,94 ± 0,89	24,56 ± 0,26
Diferença de cor (ΔE^*ab)	0,31 ± 0,09	0,63 ± 0,22
Solidez a lavagem	4,5 ± 0,0	4,5 ± 0,0

Fonte: O autor (2024)

A condição utilizada para o estudo da influência do surfactante foi a condição máxima do planejamento experimental. Observa-se que os valores apresentados nas caracterizações são, em alguns casos, iguais para os dois processos, como no caso dos testes de solidez e, no restante são de mesma ordem ao se observar o desvio padrão.

Assim, como não houve uma constatação de influência negativa do surfactante no processo, a biopurga com adição de surfactante no início do processo foi selecionada como a metodologia padrão para as seguintes etapas deste trabalho.

5.2.2 Caracterização da malha purgada por lavagem alcalina ou biopurga

As malhas tratadas pelo processo de biopurga, conforme o planejamento experimental, ou de purga convencional foram caracterizadas quanto à hidrofiliidade, à perda de massa ocasionada pelo processo, ao grau de alvura, à cor obtida com um tingimento padrão realizado nas malhas tratadas, bem como à solidez destas amostras tingidas.

Todos os resultados estão expostos na Tabela 10. Os códigos de níveis do planejamento experimental do processo de biopurga estão explicitados no item 4.3.

Tabela 10 – Caracterização das malhas tratadas por biopurga, conforme planejamento experimental, das malhas tratadas por purga convencional e crua

	Hidrofiliidade (s)	Perda de massa (%)	Grau de alvura (°C Berger)	Diferença de cor (ΔE^*ab)
Biopurga (0 0 0)	18,41 ± 3,62	7,26 ± 0,01	24,39 ± 0,09	0,32 ± 0,03
Biopurga (-1 -1 -1)	107,89 ± 21,58	5,48 ± 0,07	22,45 ± 0,59	0,40 ± 0,08
Biopurga (+1 -1 -1)	51,73 ± 6,78	5,88 ± 0,11	23,19 ± 0,33	0,52 ± 0,23
Biopurga (-1 +1 -1)	41,56 ± 4,25	5,69 ± 0,07	24,33 ± 0,54	0,39 ± 0,17
Biopurga (-1 -1 +1)	35,37 ± 4,53	6,99 ± 0,03	23,31 ± 0,47	0,24 ± 0,21
Biopurga (+1 +1 -1)	34,22 ± 2,98	6,21 ± 0,11	24,32 ± 0,24	0,62 ± 0,24
Biopurga (+1 -1 +1)	15,01 ± 3,84	6,79 ± 0,12	24,19 ± 0,22	0,69 ± 0,27
Biopurga (-1 +1 +1)	19,53 ± 3,11	6,77 ± 0,02	24,55 ± 0,23	0,56 ± 0,36
Biopurga (+1 +1 +1)	14,33 ± 2,56	7,12 ± 0,22	24,92 ± 0,76	0,37 ± 0,18

Purga convencional	16,57 ± 3,09	6,71 ± 0,07	27,49 ± 0,41	-
Malha crua	-	-	12,13 ± 0,46	1,39 ± 0,58

Fonte: O autor (2024)

5.2.2.1 Hidrofilidade

A remoção das impurezas não celulósicas confere à malha a capacidade de absorção de água, permitindo que os processos subsequentes de beneficiamento sejam eficientes.

Portanto, será realizada uma análise estatística com o objetivo de encontrar um modelo para prever o tempo de absorção de uma gota pela malha tratada, considerando as atividades das enzimas pectinase, lipase e celulase e suas interações. Os valores obtidos para os diferentes tratamentos realizados conforme o planejamento experimental, apresentados na Tabela 11 e representados graficamente na Figura 22.

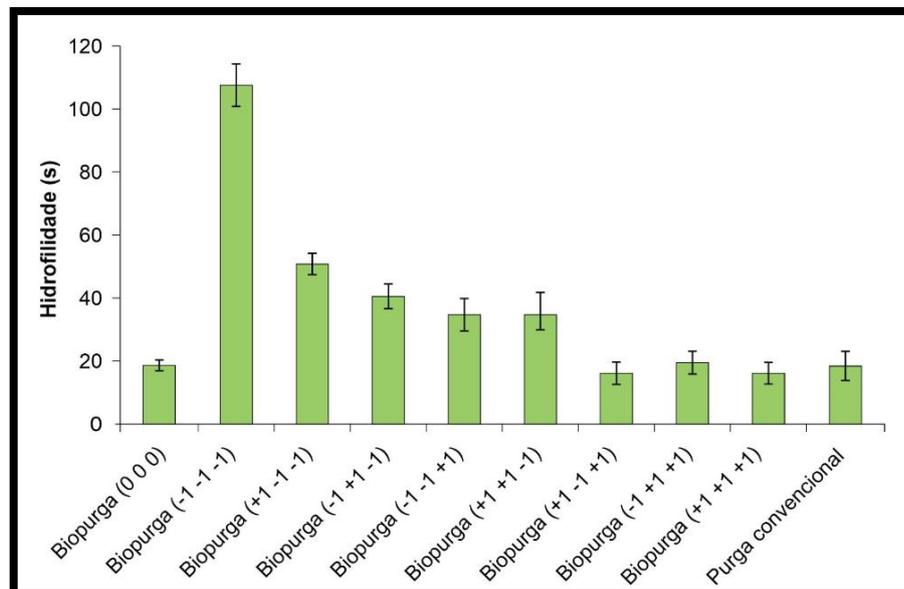
Tabela 11 – Tempo de umectação apresentado pelas malhas tratadas previamente pelo processo de biopurga (planejamento experimental)

Ensaio	Atividade (U/g de substrato)			Hidrofilidade (s)
	Pectinase	Lipase	Celulase	
1	0 (-1)	0 (-1)	0 (-1)	131
2	0 (-1)	0 (-1)	3,580 (+1)	49
3	0 (-1)	0,236 (+1)	0 (-1)	38
4	0 (-1)	0,236 (+1)	3,580 (+1)	37
5	0,868 (+1)	0 (-1)	0 (-1)	41
6	0,868 (+1)	0 (-1)	3,580 (+1)	14
7	0,868 (+1)	0,236 (+1)	0 (-1)	22
8	0,868 (+1)	0,236 (+1)	3,580 (+1)	11
9	0,434 (0)	0,118 (0)	1,790 (0)	16
10	0 (-1)	0 (-1)	0 (-1)	104
11	0 (-1)	0 (-1)	3,580 (+1)	60

12	0 (-1)	0,236 (+1)	0 (-1)	46
13	0 (-1)	0,236 (+1)	3,580 (+1)	31
14	0,868 (+1)	0 (-1)	0 (-1)	32
15	0,868 (+1)	0 (-1)	3,580 (+1)	21
16	0,868 (+1)	0,236 (+1)	0 (-1)	18
17	0,868 (+1)	0,236 (+1)	3,580 (+1)	15
18	0,434 (0)	0,118 (0)	1,790 (0)	19
19	0 (-1)	0 (-1)	0 (-1)	91
20	0 (-1)	0 (-1)	3,580 (+1)	47
21	0 (-1)	0,236 (+1)	0 (-1)	44
22	0 (-1)	0,236 (+1)	3,580 (+1)	34
23	0,868 (+1)	0 (-1)	0 (-1)	36
24	0,868 (+1)	0 (-1)	3,580 (+1)	15
25	0,868 (+1)	0,236 (+1)	0 (-1)	20
26	0,868 (+1)	0,236 (+1)	3,580 (+1)	18
27	0,434 (0)	0,118 (0)	1,790 (0)	23

Fonte: O autor (2024)

Figura 22 – Resultados dos ensaios de hidrofildade das malhas tratadas pelo processo enzimático e por purga convencional

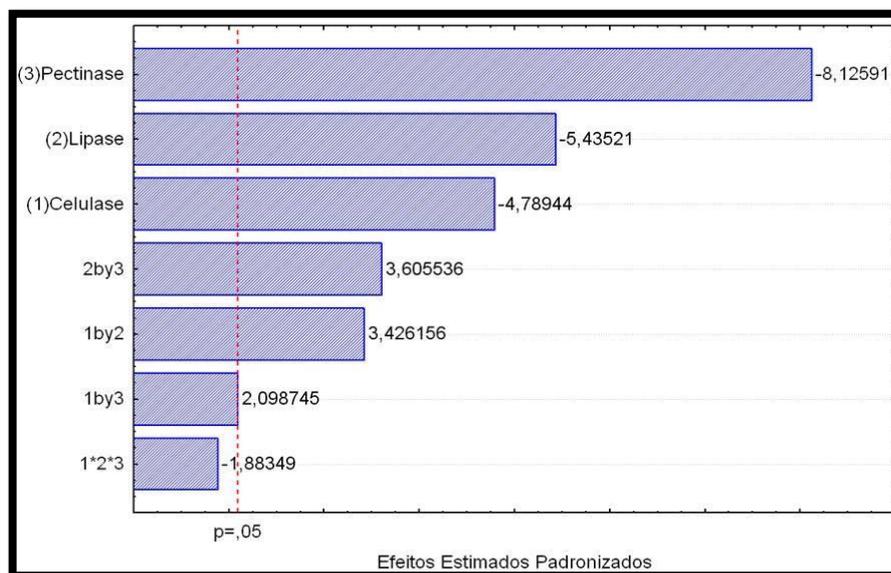


Fonte: O autor (2024)

O acréscimo das enzimas isoladamente ao banho de tratamento trouxe uma queda alta no tempo de absorção, sendo que a celulase foi a que apresentou maior tempo, seguida pela lipase. A pectinase foi a que mostrou melhor resultado quando aplicada isoladamente, 34,22 s.

As enzimas lipase e pectinase atuam nos lipídios e na pectina, respectivamente, sendo essas impurezas as principais responsáveis por impedir a absorção de água pelo material bruto, conforme visto na revisão da literatura. Assim, é esperado que estas enzimas contribuam em tornar o material mais hidrofílico. Como a pectina forma uma capa ao redor da fibra de algodão, a remoção desta é o que mais colabora na hidrofiliabilidade da malha, como pode ser observado nos efeitos obtidos na ação isolada das enzimas (Figura 23).

Figura 23 – Gráfico de Pareto dos efeitos estimados sobre a hidrofiliabilidade



Fonte: O autor (2024)

O processo baseado na ação conjunta de lipase e pectinase resultou em um tempo de umectação de 19,53 segundos. Esse tempo é superior ao da combinação de celulase e pectinase, mas inferior ao da combinação de celulase e lipase. Era esperado que as enzimas pectinase e lipase apresentassem um bom desempenho, já que isoladamente foram as que mais contribuíram para a hidrofiliabilidade da malha. No entanto, a combinação de celulase e pectinase apresentou o melhor resultado entre

as ações conjuntas de duas enzimas, comprovando o sinergismo entre elas.

A Tabela 12 apresentam os efeitos principais e de interação das variáveis independentes frente à resposta hidrofiliidade para um modelo estatístico com um limite de confiança de 95%. Percebe-se que as três enzimas e as interações entre elas, com exceção da interação tripla, foram estatisticamente significativas, uma vez que os respectivos fatores apresentaram um valor de p abaixo do nível de significância de 0,05.

Tabela 12 – Parâmetros estatísticos para o planejamento fatorial 2³

	Desvio Padrão			p	Limite de Confiança	
	Efeito	Erro	t (19)		-95%	+95%
Média/Interação	37,7237	2,189973	17,21652	0,000000	33,1200	42,2874
Celulase (1)	-22,2500	4,645634	-4,78944	0,000127	-31,9734	-12,5266
Lipase (2)	-25,2500	4,645634	-5,43521	0,000030	-34,9734	-15,5266
Pectinase (3)	-37,7500	4,645634	-8,12591	0,000000	-47,4734	-28,0266
Celulase e Lipase (1 e 2)	15,9167	4,645634	3,42616	0,002832	6,1932	25,6401
Celulase e Pectinase (1 e 3)	9,7500	4,645634	2,09874	0,049437	0,0266	19,4734
Lipase e Pectinase (2 e 3)	16,7500	4,645634	3,60554	0,001885	7,0266	26,4734
Celulase, Lipase e Pectinase (1*2*3)	-8,7500	4,645634	-1,88349	0,075033	-18,4734	0,9734

Fonte: O autor (2024)

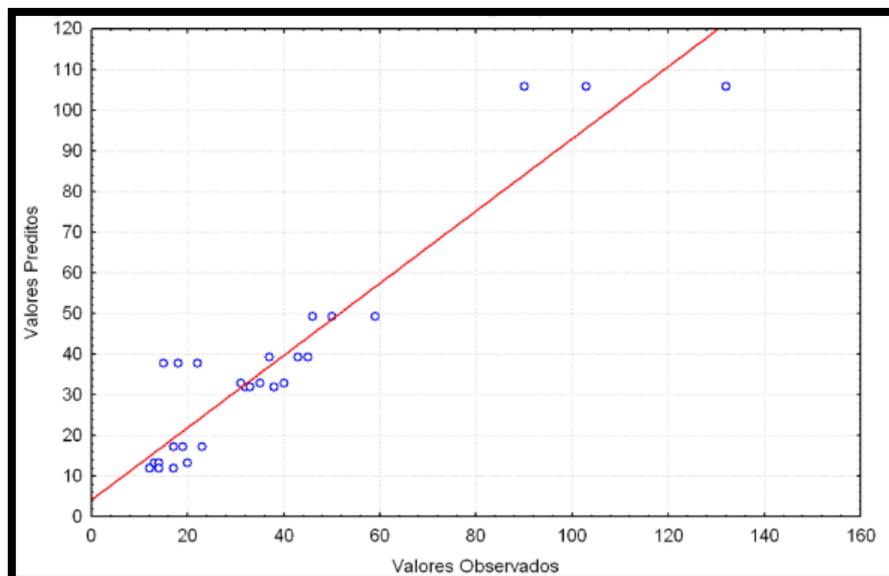
De acordo com os coeficientes estimados obtidos na análise estatística, propõe-se o modelo:

$$\begin{aligned}
 \text{Hidrofiliidade} = & 37,72 - 11,12[\text{Celulase}] - 12,62[\text{Lipase}] - 18,88[\text{Pectinase}] \\
 & + 7,96[\text{Celulase}][\text{Lipase}] + 4,88[\text{Celulase}][\text{Pectinase}] + 8,38[\text{Lipase}][\text{Pectinase}] \\
 & - 4,37[\text{Celulase}][\text{Lipase}][\text{Pectinase}]
 \end{aligned}
 \tag{Equação 17}$$

O modelo matemático empírico determinado pela Equação 17 para a hidrofiliidade da malha de algodão foi validado pela análise de variância ANOVA. O coeficiente de relação obtido foi $R^2= 0,88841$, indicando que o modelo consegue explicar 88,841% da variação total em torno da média.

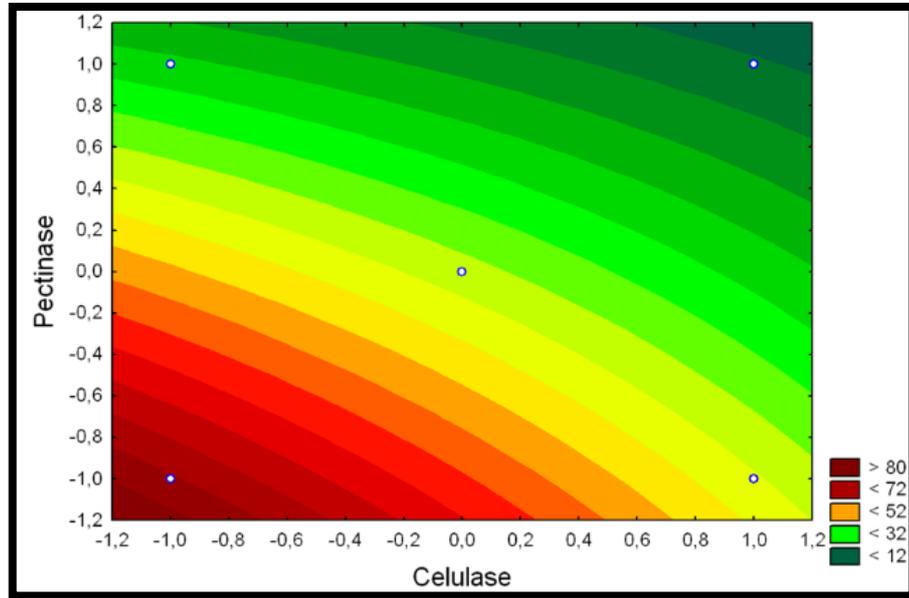
A avaliação do modelo foi feita através da observação do gráfico dos valores preditos pelo modelo versus os valores observados, sendo que os primeiros são representados pela reta, enquanto que os segundos são representados pelos pontos. A Figura 24 mostra que a relação entre os valores observados e preditos para o modelo é adequada, sendo que os pontos centrais e com a ausência de enzima foram os que apresentaram um maior desvio entre os valores preditos e os observados. As curvas de contorno geradas pelo modelo podem ser observadas na Figura 25, 26 e 27.

Figura 24 – Relação entre os valores observados e preditos do modelo linear para a hidrofiliidade



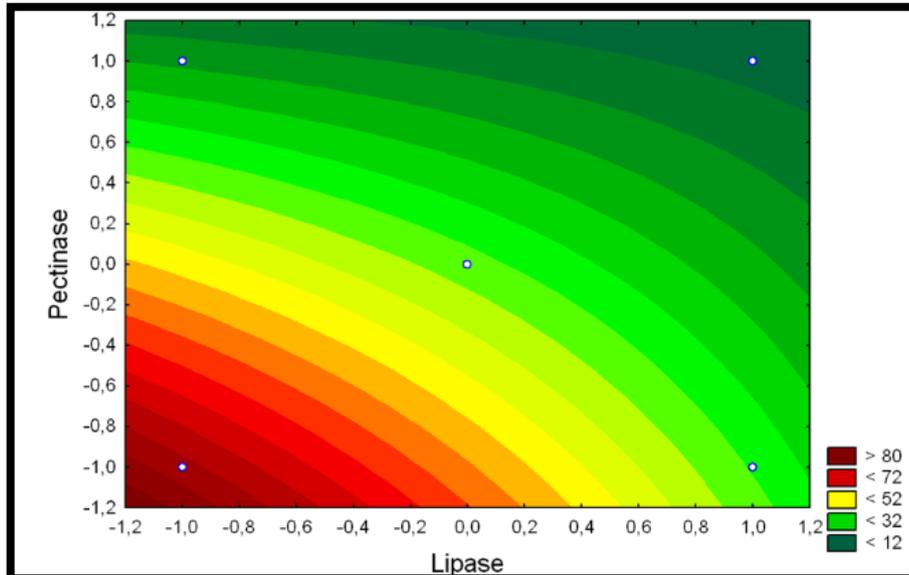
Fonte: O autor (2024)

Figura 25 – Curva de contorno para a hidrofiliidade em função da atividade das enzimas pectinase e celulase



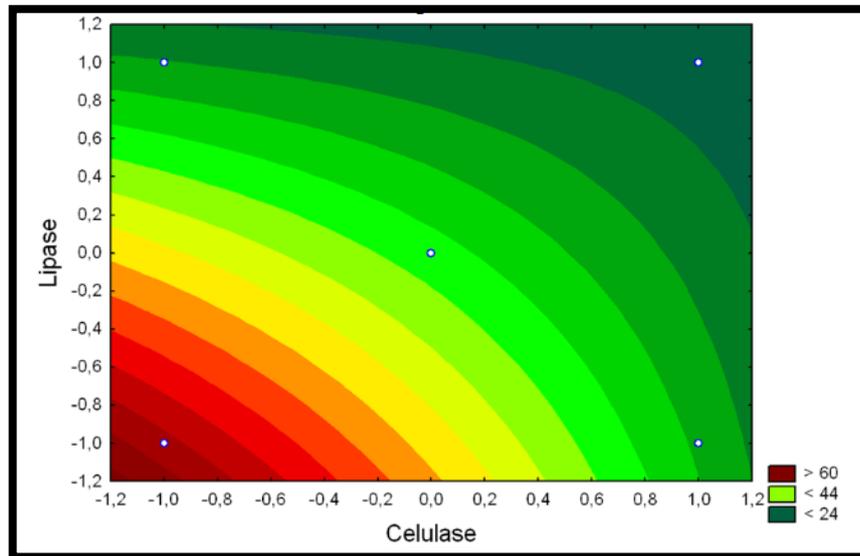
Fonte: O autor (2024)

Figura 26 – Curva de contorno para a hidrofiliidade em função da atividade das enzimas pectinase e lipase



Fonte: O autor (2024)

Figura 27 – Curva de contorno para a hidrofiliidade em função da atividade das enzimas pectinase e celulase



Fonte: O autor (2024)

Observa-se pelas figuras que a região onde se obtêm melhor hidrofiliidade, ou seja, menor tempo de absorção da gota de água pela malha, é a representada pelos tons verdes mais escuros e estes valores são obtidos com as maiores concentrações das enzimas.

A combinação de celulase e pectinase apresentou o melhor resultado para a hidrofiliidade, conforme observado nas superfícies de resposta, com o tempo de umectação sendo inferior a 13 segundos para a maior atividade de cada enzima. Em seguida, a combinação de lipase e pectinase resultou em um tempo de 17 segundos, enquanto a combinação de celulase e lipase apresentou um tempo de 25 segundos.

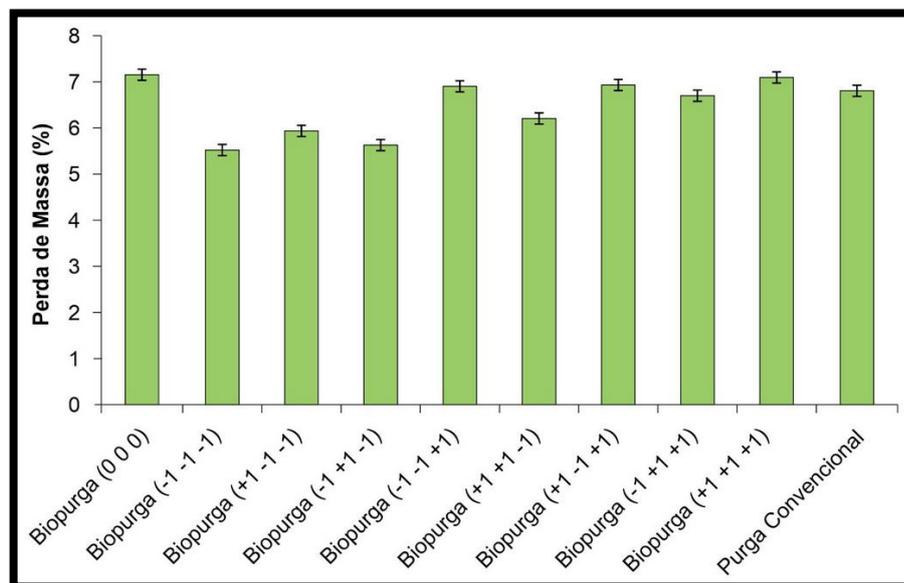
5.2.2.2. Perda de Massa

Os tratamentos realizados sobre a malha crua, tanto os correspondentes ao planejamento experimental quanto ao tratamento convencional, purga alcalina, geram uma perda de peso ao substrato têxtil. Segundo Calafell e Garriga (2004), a perda de peso pode ser uma indicação indireta da perda das impurezas da fibra de algodão, mas também pode indicar a degradação da própria fibra de celulose, ocorrência que conduz à um produto final de qualidade inferior.

As perdas de massa obtidas durante os ensaios realizados estão expostas na Tabela 10 e representadas graficamente na Figura 28. A menor perda de massa obtida é referente ao processo (-1 -1 -1). Este é o processo mais brando realizado e essa perda de massa é consequência da remoção de materiais que possam, através de atrito ou solubilização, serem retirados da malha crua.

Ao se avaliar a influência das enzimas isoladamente, em virtude da celulose, como visto na revisão bibliográfica, ser o componente de maior porcentagem na fibra de algodão (95%), espera-se que a celulase gere uma perda de massa superior às outras enzimas. Porém, como se pode observar, a biopurga composta exclusivamente pela celulase apresentou uma perda de massa de 5,88%, somente um pouco superior à da biopurga sem a adição de enzimas. Isso pode ser explicado pela presença da cutícula que não permite o acesso da celulase às camadas das fibras que possuem maior concentração de celulose, sendo que esta enzima consegue atacar somente fibrilas que estejam expostas.

Figura 28 – Resultados dos ensaios de perda de massa das malhas tratadas pelo processo enzimático e por purga convencional



Fonte: O autor (2024)

A biopurga composta pela lipase gerou uma perda de 5,69% de massa, que com o desvio padrão pode ser considerada de mesma ordem da biopurga sem presença de enzimas. A lipase ataca as ceras que constituem cerca de 0,6% da fibra de algodão. Porém estas ceras estão parcialmente disponíveis, já que a pectina age como uma cola que impede em parte a disponibilidade do substrato da lipase.

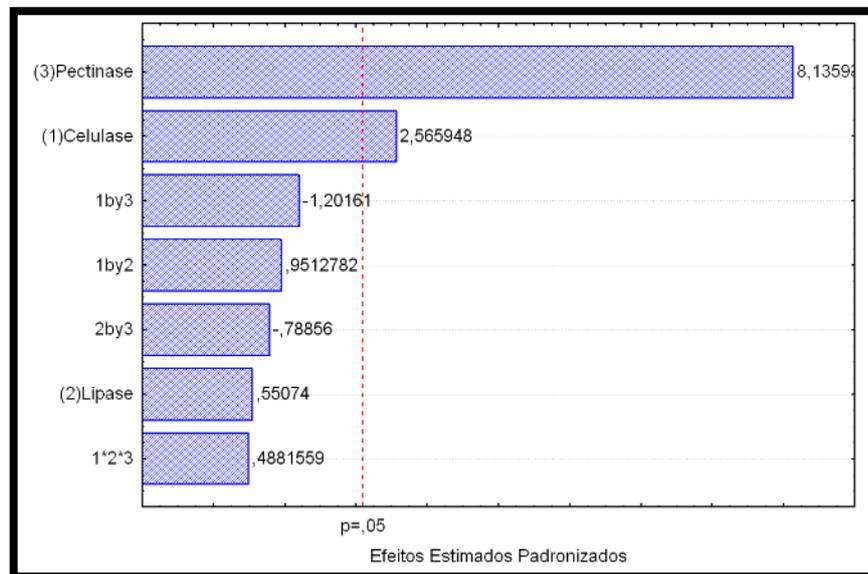
A grande responsável pela retirada de impurezas é a pectinase, uma vez que essa enzima possui seu substrato disponível ao ataque e esta é uma das impurezas não celulósicas em maior concentração. A perda de massa apresentada pela ação exclusiva da pectinase foi de 6,99%. A perda de massa apresentada nos ensaios de combinação de enzimas não apresentou grandes variações, sendo que somente a combinação de celulase e lipase se distanciou da média com uma perda de massa menor. Isso ocorre, pois, como discutido anteriormente, o substrato destas enzimas não se encontram muito disponíveis e elas necessitam do auxílio da pectinase.

Vigneswaran, Ananthasubramanian e Anbumani (2012) observaram que a combinação enzimática lipase/celulase para o processo de biopurga não apresentou variações na perda de massa do artigo têxtil a medida que se aumentava a concentração das enzimas, já as combinações celulase/pectinase e pectinase/lipase apresentaram variação, principalmente com relação à enzima pectinase. Isso corrobora o observado nos resultados deste trabalho, com a pectinase como a enzima com maior expressão na perda de massa originada pelo tratamento enzimático.

Um ponto a se discutir é a perda de massa apresentada pela purga convencional. Ela é inferior em comparação com algumas biopurgas. Por se designar ao tingimento de cores escuras, a lavagem alcalina selecionada para este trabalho não é tão agressiva quanto à que se realiza para o tingimento de cores claras, purga mais comumente encontrada nos estudos que desenvolvem a biopurga em comparação à purga convencional.

Apesar de alguns processos enzimáticos apresentarem valores superiores de perda de massa em relação à lavagem alcalina, sabe-se que o processo convencional ao fazer a retirada das impurezas também ataca a celulose, podendo enfraquecer a fibra. Enquanto que no processo de biopurga as enzimas pectinase e lipase atacam especificamente as impurezas com o auxílio da celulase.

Figura 29 – Gráfico de Pareto dos efeitos estimados sobre a perda de massa



Fonte: O autor (2024)

A análise estatística realizada permite verificar através do gráfico de Pareto (Figura 29) que a ação isolada das enzimas pectinase e celulase se mostraram estaticamente significativas para a perda de massa resultante do tratamento enzimático. Esta análise comprova o que foi discutido com relação à ação exclusiva das enzimas e elucida que as pequenas diferenças mostradas nos processos com lipase e combinação de enzimas não foram expressivas.

5.2.2.3. Grau de alvura

Alguns pigmentos naturais da fibra de algodão podem ser removidos na lavagem do substrato têxtil, uma vez que estes pigmentos se encontram adsorvidos às substâncias pécticas e proteicas, impurezas retiradas durante o processo de purga alcalina ou biopurga (KARAPINAR e SARIISIK, 2004). Assim, mediu-se o grau de alvura, em °Berger, das malhas tratadas por lavagem enzimática, a fim de se observar a influência de cada enzima e, para grau de comparação, foram realizadas a medida de grau de alvura de malha crua e da malha tratada por lavagem alcalina.

Os resultados obtidos encontram-se dispostos na Tabela 10 e representados graficamente na Figura 30. Primeiramente pode-se notar que todas as lavagens

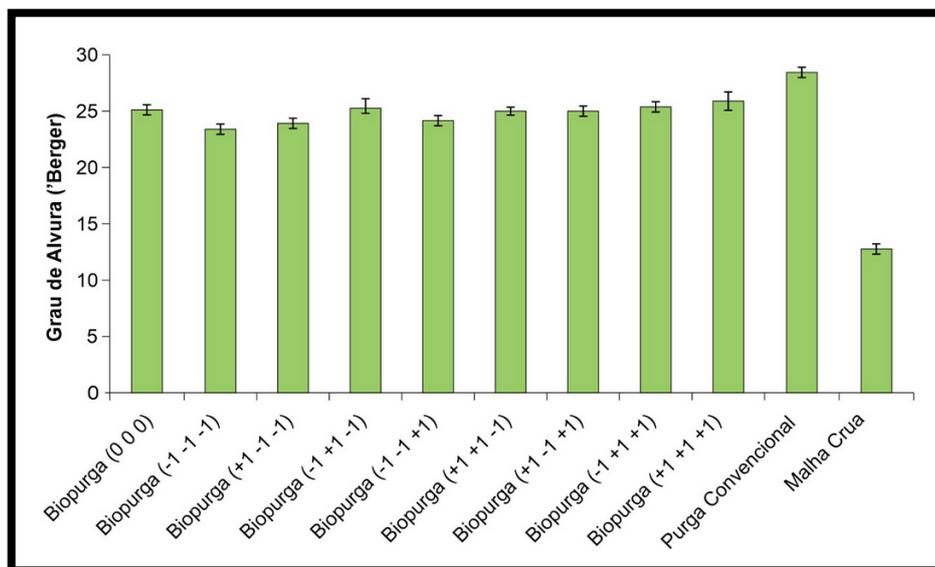
realizadas na malha resultaram em um acréscimo relevante do grau de alvura em relação à malha crua que apresentou 12,13 °Berger.

Nos processos de biopurga observa-se que não houve grandes diferenças no grau de alvura apresentado pelas distintas combinações enzimáticas, variando de 23,19 °Berger (biopurga composta somente por celulase) a 24,92 °Berger (biopurga composta pelas três enzimas na sua condição máxima).

O tratamento com maior grau de branco foi a purga convencional, 27,49 °Berger. Contudo, as biopurgas apresentaram um valor muito próximo, sendo cerca de, em média, 12% menor. O melhor valor apresentado entre os tratamentos enzimáticos é 9,34% menor que o observado na malha tratada convencionalmente.

Segundo Freitas (2009), o grau de alvura possui uma relação com o surfactante, sendo que o aumento da concentração de surfactante aumenta o grau de branco das amostras biopurgadas.

Figura 30 – Resultados dos ensaios de grau de alvura das malhas tratadas pelo processo enzimático e por purga convencional

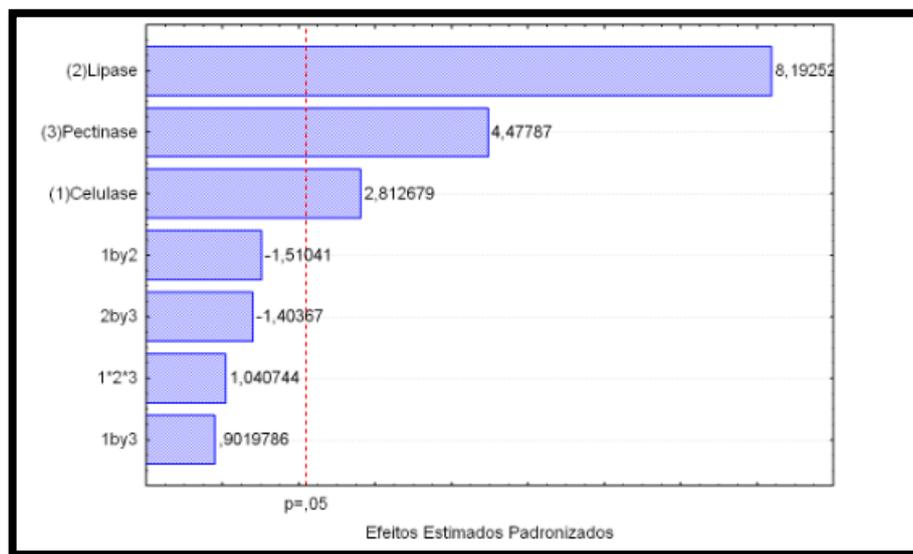


Fonte: O autor (2024)

Deve-se salientar que a busca de um grau de alvura elevado é mais propício para o tingimento de cores claras. No tingimento de cores escuras, a alta concentração de corantes diminui a influência do grau de branco do substrato e o pequeno desvio

que talvez seja gerado pode ser minimizado ou excluído com um ajuste na concentração dos corantes. Assim, a opção de elevar o tempo de reação e/ou atividade das enzimas não deve ser considerada para aumentar somente o grau de alvura, uma vez que esta característica não é de extrema importância para o posterior tingimento de cores escuras e, além disso, elevaria os custos do processo. A análise estatística de significância é exposta através do gráfico de Pareto da Figura 31.

Figura 31 – Gráfico de Pareto dos efeitos estimados sobre o grau de alvura



Fonte: O autor (2024)

O gráfico mostra que as enzimas lipase, pectinase e celulase possuem uma significância no grau de alvura, enquanto que as combinações destas não. A lipase é a enzima que mais influencia na obtenção de um melhor grau de alvura.

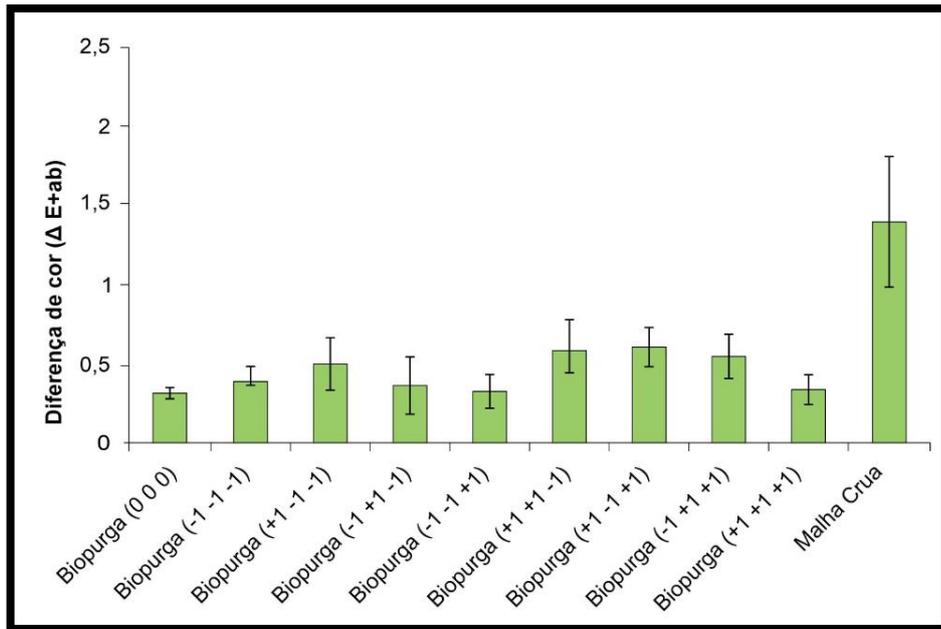
5.2.2.4. Grau de tingimento

Para a análise de cor foi avaliado o parâmetro ΔE^*ab que dimensiona a diferença de cor em relação ao padrão. Este fator é calculado com base nos parâmetros L^* , a^* e b^* . Quanto maior o valor de ΔE^*ab , maior será a diferença da amostra ao padrão.

Os valores expostos na Tabela 10 e representados graficamente pela Figura 32 são os resultados da diferença de cor obtida nos tingimentos da malha crua e das

malhas biopurgadas.

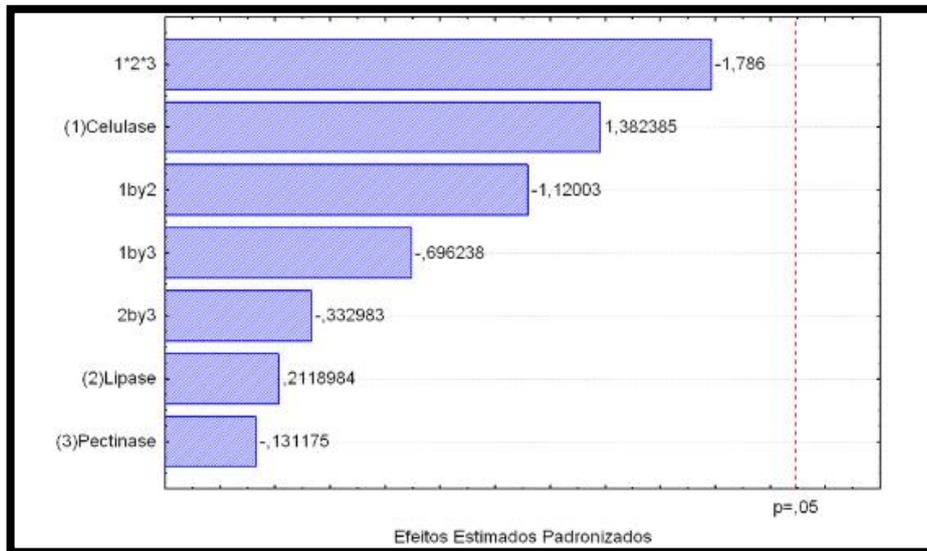
Figura 32 – Resultados dos ensaios da determinação de diferença de cor das malhas tratadas pelo processo enzimático e por purga convencional



Fonte: O autor (2024)

Pode-se observar que a diferença de cor obtida (ΔE^{*ab}) varia de 0,24 a 0,69 para as malhas biopurgadas. Estes valores correspondem a uma faixa bem pequena e, com os desvios padrões elevados, não se pode avaliar a influência do tipo de tratamento enzimático realizado na fase de preparação da malha. Isto também pode ser concluído com o auxílio do gráfico de Pareto exposto na Figura 33. Nenhuma ação isolada ou composta das enzimas foi significativa na resposta ao tingimento para um nível de significância de 5%.

Figura 33 – Gráfico de Pareto dos efeitos estimados sobre o grau de cor



Fonte: O autor (2024)

Um dos fatores que contribui para a cor final do tingimento é o grau de alvura da malha tratada e este, como discutido anteriormente, também não apresentou grande variação. Somente a malha crua apresentou um grau de alvura distinto e, como pode se observar, a diferença de cor obtida pela malha crua foi muito superior, 1,39.

O espaço CIELAB mostrou que o tingimento da malha crua resultou em um artigo mais claro, menos vermelho e mais azul do que o tingimento da purga alcalina. Isso revela que a diferença de cor não corresponde somente ao grau de alvura, pois, se este fosse o caso, o resultado seria uma cor apenas com luminosidade menor. Assim, as impurezas presentes na malha crua impediram que o processo de tingimento tivesse a mesma eficiência que o realizado na malha tratada, uma vez que a concentração de corante fixado foi menor, ocasionando um tom mais claro.

5.2.2.5. Solidez

A solidez à lavagem de um artigo têxtil está relacionada à força da interação entre o corante utilizado no tingimento e a fibra do substrato, enquanto que a solidez à luz está diretamente ligada ao grupo cromóforo do corante. As metodologias utilizadas nos testes de solidez são normalizadas pela Associação Brasileira de

Normas Técnicas, porém, conforme Piccoli (2008), não se possui no Brasil legislação ou publicação oficial acerca de padrões para notas mínimas exigidas. As empresas, conforme a aplicação de seu produto, necessidades dos consumidores e critérios de qualidade estabelecem valores dentro das escalas de avaliação da solidez.

Todas as malhas tingidas obtiveram nota 4,5 nos testes de solidez à lavagem e solidez à luz. Isso constata que o corante utilizado se adequa ao substrato, pois possui forte interação com a fibra de algodão, e que o processo de tingimento é eficiente, uma vez que não há uma quantidade de corante hidrolisado na malha tingida que irá diminuir a nota de solidez.

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Nesta etapa, é analisado o custo total do processo, como tempo de máquina, água e insumos. O custo de energia não é contabilizado diretamente devido à falta de uma ferramenta específica, no entanto, indiretamente este custo se reflete no tempo de processo, já que uma etapa que é realizada a 95°C passa a ser feita a 55°C e, portanto, irá precisar de um tempo menor para atingir o patamar estipulado. Os custos foram realizados para uma máquina com capacidade de 600 kg de malha e relação de banho 1:6.

O processo proposto (biopreparação [52 [min] + tingimento [284 min] + ensaboamento [232 min]) apresentou tempo final de 568 min. Para a purga alcalina o tempo de processo total foi de 604 min, com 88 min para a etapa de preparação e os mesmos valores para as demais etapas. O custo por minuto de máquina é de R\$ 1,46, resultando em um custo de R\$ 829,3 para a biopurga e R\$ 881,8 para o processo convencional, conforme Figura 34.

Figura 34 – Comparativo entre tempo e custo do processo convencional versus enzimático



Fonte: O autor (2024)

Toda a água utilizada no processo é contabilizada, o custo de 1 m³ de água da estação de tratamento (ETA) é de R\$ 0,82, que é a água limpa utilizada para a fabricação do produto. Após seu descarte para a estação de tratamento de efluente (ETE) o seu custo para tratá-lo é de R\$ 3,37. Considerando que o consumo de água para o processo de purga alcalina é de 9 L/kg, portanto, para 600 kg são utilizados 5400 L, ou seja, 5,4 m³ para cada banho. São utilizados 3 banhos na preparação convencional, deste modo 16,2 m³. Para a biopurga é necessário somente 6 L/kg, portanto, 3,6 m³ são usados para cada banho, ou seja, 7,2 m³ ao todo, pois são aplicados somente 2 banhos. Tem-se uma economia de R\$ 37,71/m³ de água no processo de preparação. A Tabela 13 apresenta a quantidade de água (m³) consumida e custo para todos os processos estudados.

Tabela 13 – Análise da quantidade de água nos processos de preparação

Processo	Nº de banhos	ETE + ETA (m ³)	Custo (R\$)
Convencional	3	16,2	67,87
Biopurga	2	7,2	30,16

Fonte: O autor (2024)

Para a etapa de biopreparação o custo total é de R\$ 273,84, para o alvejamento convencional R\$ 317,19. Para a obtenção destes valores, se teve como base o custo e concentração de cada insumo abordado na Tabela 14.

Tabela 14 – Custo dos insumos

Reagente	Custo (R\$/kg)
Surfactante sustentável	13,80
Hidróxido de sódio	5,80
Sequestrante	12,90
Ácido acético	10,50
Fixador	8,93
Carbonato de sódio	15,10
Cloreto de sódio	8,07
Pectinase	32,49
Lipase	33,23
Celulase	32,68
Corante	45,08

Fonte: O autor (2024)

A Tabela 15 apresenta um resumo de custos com todos os insumos, tempo, água e produtos químicos, para cada processo.

Tabela 15 – Custo de uma partida em máquina de capacidade de 600 kg de malha comparando o processo convencional com o novo processo

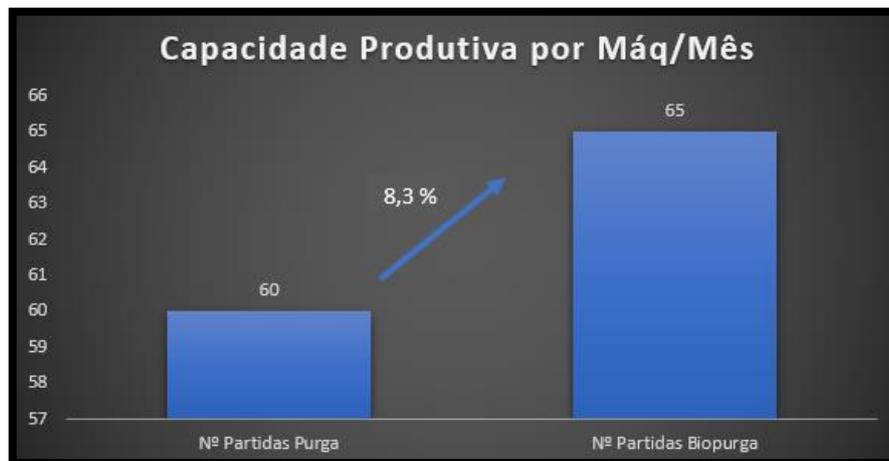
Processo	Tempo Custo (R\$)	Água Custo (R\$)	Químicos Custo (R\$)	Total (R\$)
Convencional	881,8	248,9	4.610,4	5.741,1
Biopurga	829,3	211,2	4.657,4	5.697,9
Diferença	52,5	37,7	- 47,0	43,2

Fonte: O autor (2024)

O custo total de uma partida em máquina de capacidade de 600 kg com o processo convencional é de R\$ 5.741,1, já para a biopreparação + tingimento + ensaboamento é de R\$ 5.697,9, gerando uma diferença de R\$ 43,2 por partida.

Para simularmos o ganho em capacidade produtiva considera-se uma produção trabalhando 24 horas por dia durante 25 dias. O tempo para o processo convencional é de 604 min gerando um total de 2,4 partidas/dia por máquina (60 partidas/mês), enquanto para o novo processo o tempo total é de 568 min tendo a possibilidade de 2,6 partidas/dia (65 partidas/mês), gerando um aumento de 8,3% de capacidade produtiva por máquina (Figura 35). Portanto, têm-se um acréscimo de 5 partidas por mês/máquina quando comparado com o processo convencional, isto, ao longo de 1 mês seriam 125 partidas a mais. Em um ano de trabalho (considerando 300 dias úteis), teria se um acréscimo de 1.500 partidas.

Figura 35 – Capacidade produtiva diária purga x biopurga



Fonte: O autor (2024)

Para uma análise mais concreta, sabe-se que para o processo convencional são realizadas 60 partidas/dia com um custo de R\$ 344.466, já para biopurga são realizadas 65 partidas/dia que geram uma despesa de R\$ 370.363. Como base de cálculo podemos considerar essas 25 máquinas/dia com uma média de 600 kg de malha por partida, deste modo, para o processo convencional obtêm-se um valor de 36 toneladas (T)/dia, já para o processo que utiliza a biopurga, 39 T/dia, conforme Figura 36.

Figura 36 – Comparativo entre nº de partidas e volume de produção diário purga versus biopurga



Fonte: O autor (2024)

A empresa recebe dos seus clientes para realizar o processo de tingimento uma média de R\$ 13,30/kg, portanto, ao longo de um dia para o processo que utiliza a biopreparação obtém-se o valor de R\$ 518.700, por outro lado, no processo convencional R\$ 478.800. Um aumento diário de receita bruta de R\$ 39.900, com um lucro a mais de R\$ 14.003/dia.

Ao longo de 1500 partidas superior ao ano ao comparar os processos, o lucro obtido seria de aproximadamente 4.2 milhões de reais com estas partidas. Para se ter um comparativo, uma máquina de tingimento de 600 kg custa em torno de R\$ 1,7 milhão, portanto, com este valor a empresa poderia comprar duas máquinas novas por ano.

Desta forma conclui-se que o processo de biopreparação seguido de tingimento e ensaboamento, além de atender os requisitos de qualidade necessários para o processo de produção, é economicamente viável, gerando um ganho em capacidade produtiva de 8,3% ao ano e um custo de processo mais econômico.

6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, são obtidas as seguintes conclusões:

- A caracterização das enzimas revelou a presença de atividades secundárias nos caldos comerciais e mostrou uma queda na atividade das enzimas nas condições estabelecidas para a biopurga. A lipase apresentou a maior perda de atividade, 47,71%, pois suas condições ótimas são as mais distantes das condições de operação do processo enzimático.
- A presença do surfactante sustentável (QI ORG II) não interferiu na atividade das enzimas e a sua adição no banho de biopurga não apresentou alterações significativas nas propriedades finais das mantas tratadas. Portanto, o método de adição de surfactante no início da reação enzimática é considerado o mais eficaz.
- A análise de todas as caracterizações realizadas com as malhas tratadas pelas diferentes biopurgas examinadas evidencia que as enzimas estudadas neste trabalho podem atuar de forma combinada no processo, compondo um “*pool enzimático*”, uma vez que a ação de uma enzima não interferiu negativamente na ação da outra enzima e, na maioria das vezes, a atuação conjunta trouxe benefícios à malha.
- Observou-se que a pectinase foi a enzima mais determinante na perda de peso e hidrofiliabilidade da malha, uma vez que os seus substratos são mais concentrados e facilmente disponíveis do que os de outras enzimas.
- A perda de massa de algumas biopurgas foi superior à da preparação alcalina, porém, esta última já é um processo mais brando por se destinar ao tingimento de cores escuras.
- O grau de alvura não apresentou grandes variações conforme o tratamento enzimático utilizado e, em média, foi 12% inferior ao resultante da purga alcalina.
- Sob as condições de pH 6,5, temperatura 55 °C e com um tempo de reação de 40 min, a combinação enzimática que melhor atendeu os requisitos de

hidrofilidade (14,36 s), grau de alvura (24,92 °Be) e rendimento do tingimento foi o ensaio com a atividade máxima das três enzimas.

- A análise econômica foi fundamentada por meio da análise dos custos de insumos e processos, onde se verificou a possibilidade de aumento de 8,3% na capacidade produtiva. Conseqüentemente, o “*pool enzimático*” apresentou potencial para ser empregado em processo fabril, e que sua utilização pode ser tão eficaz quanto o processo convencional.
- O desafio do futuro é, portanto, preencher a lacuna entre os esforços dos pesquisadores e a direção da indústria. Uma estimativa, mesmo que aproximada, dos efeitos econômicos da adoção generalizada dessas tecnologias também é relevante, para que as indústrias estejam dispostas a investir neste processo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, sugere-se para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Avaliar a possibilidade de reuso do banho enzimático;
- Verificar a redução da toxicidade do efluente da preparação enzimática em relação ao efluente do processo convencional;
- Determinar o grau de toxicidade dos efluentes oriundos do processo de biopurga e convencional;

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11914**: Análise quantitativa de materiais têxteis - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10591**: Materiais têxteis - Determinação da gramatura de superfícies têxteis. Rio de Janeiro, 2008. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13216**: Materiais têxteis - Determinação do título de fios em amostras de comprimento reduzido. Rio de Janeiro, 1994. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13000**: Material têxtil - Determinação da hidrofiliidade de tecido - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1993. 2 p.

ABDULRACHMAN, D. et al. Heterologous expression of *Aspergillus aculeatus* endopolygalacturonase in *Pichia pastoris* by high cell density fermentation and its application in textile scouring. **BMC Biotechnology**, v. 17, n. 1, p. 15, 16 dez. 2017.

ABIT. **Perfil do setor**. Disponível em: <<https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

AGGARWAL, R.; DUTTA, T.; SHEIKH, J. Extraction of pectinase from *Candida* isolated from textile mill effluent and its application in bio-scouring of cotton. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 17, p. 100291, 2020.

AGRAWAL, P. B.; NIERSTRASZ, V. A.; BOUWHUIS, G. H.; WARMOESKERKEN, M. M. C. G. Cutinase and pectinase in cotton bioscouring: an innovative and fast bioscouring process. *Biocatalysis and Biotransformation*, v. 26, n. 5, p. 412–421, 2005.

AGYEI D, SHANBHAG BK, HE L. Enzymes for food waste remediation and valorisation. In: **Improving and tailoring enzymes for food quality and functionality**. Woodhead Publish; 2015, p. 123–45.

AHMAD, S.; ULLAH, T.; ZIAUDDIN. Fibers for Technical Textiles. In: [s.l: s.n.]. p. 21–47.

ALY, A. S.; MOUSTAFA, A. B.; HEBEISH, A. Bio-technological treatment of cellulosic textiles. **Journal Of Cleaner Production**, S. L., v. 12, n. 7, p.697-705, 2004.

AL-ZUHAIR, S.; TAHER, H. **Supercritical Fluids Technology in Lipase Catalyzed Processes**. [s.l.] CRC Press, 2018. XU, F. Applications of oxidoreductases: Recent progress. **Industrial Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 38–50, mar. 2005.

ANDREAUS, J.; COLOMBI, B. L.; GONÇALVES, J. A.; SANTOS, K. A. Processing of cotton and man-made cellulosic fibers. In: CAVACO-PAULO, A.; NIERSTRASZ, V. A.; WANG, Q. (Eds.). *Advances in Textile Biotechnology*. Second ed. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 185–238.

APARAJITA SEN, KAPILA, CHAUDHARY, “Biotechnological Applications of Microbial Enzymes to Replace Chemicals in the Textile Industry- A Review”, **Journal of the Textile Association**, 82/2 (68-73), 2021.

ARAÚJO, R.; CASAL, M.; CAVACO-PAULO, A. Design and engineering of novel enzymes for textile applications. In: **Advances in Textile Biotechnology**. [s.l.] Elsevier, 2010. p. 3–31.

BECHTOLD, T.; SCHIMPER, C. B. Hydrolysis of regenerated cellulose fibres for textile and other applications. In: **Advances in Textile Biotechnology**. [s.l.] Elsevier, 2010. p. 312–327.

BHALA, R.; DHANDHARIA, V.; PERIYASAMY, A. P. . Bio-finishing of fabrics. **Asian Dyer**, p. 45–49, 2012.

BORNSCHEUER, U. T. Microbial carboxyl esterases: classification, properties and application in biocatalysis. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 26, n. 1, p. 73–81, mar. 2002.

BRISTI, U.; PIAS, A. K.; LAVLU, F. H. A Sustainable process by bio- scouring for cotton knitted fabric suitable for next generation. **Journal of Textile Engineering & Fashion Technology**, v. 5, n. 1, 15 fev. 2019.

BUCHERT, J., PERE, J., Scouring of cotton with Pectinases, Proteases and Lipases, **Textile Chemist and Colorist&American Dyestuff Reporter**, Vol.32(5), pp.48-52, 2000.

BUNSELL, A. R. Introduction to the science of fibers. In: **Handbook of Properties of Textile and Technical Fibres**. [s.l.] Elsevier, 2018. p. 1–20.

BUSCHLE-DILLER, G. et al. Effects of Scouring with Enzymes, Organic Solvents, and Caustic Soda on the Properties of Hydrogen Peroxide Bleached Cotton Yarn. **Textile Research Journal**, v. 68, n. 12, p. 920–929, 2 dez. 1998.

CALAFELL, M.; GARRIGA, P. Effect of some process parameters in the enzymatic scouring of cotton using an acid pectinase. **Enzyme Microbiology Technology**, S. L., v. 34, p.356-331, 2004.

CAVACO-PAULO, A. **Influência da Agitação Mecânica e da Composição Enzimática no Tratamento do Algodão com Celulases**.1995. 75 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Têxtil, Departamento de Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 1995.

CHANDEL, A. K.; SILVA, S. S. (Comp.). **Sustainable Degradation of Lignocellulosic Biomass: Techniques, Applications and Commercialization**. S. L.: Intech, 2013. Cap. 6, p. 119-155.

CHOUDHURY, A. K. R. **Principles of Textile Finishing**. [s.l.] Elsevier, 2017.

CIECHAŃSKA, D.; WESOŁOWSKA, E.; WAWRO, D. An introduction to cellulosic fibres. In: **Handbook of Textile Fibre Structure**. [s.l.] Elsevier, 2009. p. 3–61.

COLOMBI, B. L. et al. 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, out. 2021.

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. **The Journal of The Textile Institute**, v. 113, n. 5, p. 857–868, 2022.

DE MELO DA SILVA, L. G. et al. Study and application of an enzymatic pool in bioscouring of cotton knit fabric. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 95, n. 7, p. 1253–1260, jul. 2017.

DEMIR, A. G. et al. New Possibilities of Raw Cotton Pre-treatment before reactive dyeing. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 460, p. 012026, 24 dez. 2018.

EDI, B. M.; IBRAHIM, N. A. Recent developments in sustainable finishing of cellulosic textiles employing biotechnology. **Journal of Cleaner Production**, v. 284, p. 124701, fev. 2019.

ETTERS, J. N. et al. Alkaline pectinase: An eco-friendly approach to cotton preparation. **Textile Asia**, v. 5, p. 83-85, 1999.

FERNANDES, M. L. M.. **Hidrólise de Triglicerídeos e Síntese de Éster de Ácido Graxo em Sistema de Micelas Reversas**. 111 f. 2002. Dissertação (Mestrado) – Curso de Química, Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

FERRARA, M. A. .; SIANI, A. C. .; BON, E. P. S. . Processos de bioconversão aplicados à obtenção de fármacos e intermediários. In: **Biotecnologia Aplicada à Agro&Indústria - Vol. 4**. 1. ed. [s.l.] Blucher, 2017. p. 1069.

FERREIRA, F. C. S. **Avaliação dos Efeitos da Aplicação da Enzima Celulase nas Propriedades de Substratos Têxteis de Algodão**. 2012. 111 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012b.

FETZNER, S.; STEINER, R. A. Cofactor-independent oxidases and oxygenases. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 86, n. 3, p. 791–804, 16 abr. 2010.

FILLETI, J. P.; BOLDRIN, R. A indústria têxtil no Brasil: um modelo econométrico analisando a hipótese de desindustrialização setorial. **Economia e Sociedade**, v. 29, n. 3, p. 861–890, dez. 2020.

FRANKE, D.; NORTHEIM, C.; BLACK, M. Furnishings and the Indoor Environment. **Journal of the Textile Institute**, v. 85, n. 4, p. 496–504, jan. 1994.

FREITAS, K. R. **Estabilização Enzimática para Aplicação em Biopurga de Tecidos de Malha de Algodão**. 2009. 175 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Química, Programa Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

FRONZAGLIA, M. L. et al. A percepção dos empresários da cadeia têxtil sobre sua relação com o estado brasileiro / The perception of textile chain entrepreneurs about their relationship with the brazilian state. **Brazilian Journal of Business**, v. 2, n. 3, p. 3002–3022, 2020.

FUJITA, R. M. L.; JORENTE, M. J. A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. *ModaPalavra e-periódico*, v. 8, n. 15, p. 153–174, 2015.

FURLAN, F. R. **Caracterização e Aplicação de Enzimas de Forma Combinada na Biopreparação de Tecidos Felpudos de Algodão**. 2012. 134 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

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

GURURAJ, P.; KHUSHBU, S.; MONISHA, B.; SELVAKUMAR, N.; CHAKRAVARTHY, M.; GAUTAM, P.; NANDHINI DEVI, G. **Production, purification and application of Cutinase in enzymatic scouring of cotton fabric isolated from Acinetobacter baumannii AU10**. *Preparative Biochemistry and Biotechnology*, p. 1–12, 2020.

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

HAITAO, R.; JIANYONG, L. Effects of different scouring methods on the catalytic efficiency of pectinase for cotton knitted fabrics. *Textile Research Journal*, v. 89, n. 4, p. 635–644, 2019.

HARTZELL, M.M.;HSIEH, Y-L. Pectin-Degrading Enzymes for Scouring Cotton, In **ACS Symposium Series** 687 (eds. Eriksson K. and Cavaco-Paulo A.) Washington, D.C.,pp.212- 227, 1998b.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L. A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 95, p. 30–44, 2015.

HASSAN, M. M.; SAIFULLAH, K. Effect of Enzymatic Bio-scouring on the Dyeability, Physicochemical, and Mechanical Properties of Jute Fabrics. **Fibers and Polymers**, v. 20, n. 3, p. 578–587, 29 mar. 2019.

HAUSER, P. Fabric Finishing. In: **Textiles and Fashion**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 459–473.

HERNANDEZ, E.; NOWACK, B.; MITRANO, D. M. Polyester Textiles as a Source of Microplastics from Households: A Mechanistic Study to Understand Microfiber Release During Washing. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 12, p. 7036–7046, 20 jun. 2017.

JAEGER, K.; REETZ, M. T. Microbial Lipases Form Versatile Tools for Biotechnology. **Trends In Biotechnology**, S. L., v. 16, n. 9, p.396- 403, 1998.

JAYANI, R. S.; SAXENA, S.; GUPTA, R. Microbial pectinolytic enzymes: A review. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 9, p. 2931–2944, set. 2005.

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.

KALANTZI, I. et al. Heavy metals, trace elements and sediment geochemistry at four Mediterranean fish farms. **Science of The Total Environment**, v. 444, p. 128–137, fev. 2013.

KALANTZI, S.; KEKOS, D.; MAMMA, D. Bioscouring of cotton fabrics by multienzyme combinations: application of Box–Behnken design and desirability function. **Cellulose**, v. 26, n. 4, p. 2771–2790, 21 mar. 2019.

KAPOOR, M.; GUPTA, M. N. Lipase Promiscuity and its Biochemical Applications. **Process Biochemistry**, S. L., v. 47, p.555-569, 2012.

KARAPINAR, E.; SARIISIK, M. O. Scouring of Cotton with Cellulases, Pectinases and Proteases. **Fibres and Textiles in Eastern Europe**, v. 12, p.79-82, 2004.

KAUR, A. et al. Cost-effective scouring of flax fibers using cellulase-free xylano-pectinolytic synergism from a bacterial isolate. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 107–111, set. 2016.

KHUNKRONG, T.; ALDRED, A. K.; BUTTARAJ, K. **Bio-scouring of cotton fabric with pectinase combined with natural surfactant from soapnut**. 4th Industrial Revolution and Its Impacts. **Anais...**Thailand: Walailak University, 2019.

KIM, H. R.; SONG, W. S. Lipase treatment of polyester fabrics. **Fibers and Polymers**, v. 7, n. 4, p. 339–343, dez. 2006.

KOIVULA, A., LINDER, M., TEERI, T.T., Structure-function Relationships in Trichoderma Cellulolytic enzymes, **In Trichoderma and Gliocladium Vol.2 Enzymes, Biological Control and Commercial Applications** (eds. Harman G.E. and Kubicek C.P.), Taylor&Francis, pp.3- 23, 1998.

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

KON, A.; COAN, D. C. **Transformações da indústria têxtil brasileira: a transição para a modernização**. Disponível em: <<http://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rem/article/view/774>>. Acesso em: 20 dez. 2022.

LANGE, N. K. Lipase-Assisted Desizing of Woven Cotton Fabrics. **Textile Chemist & Colorist**, v. 29, n. 6, p. 23–26, 1997.

LI, Y. H.;HARDIN, I. R.**Textile Chemist and Colourist**, Vol.29, pp.71, 1997.

LI, Y.; HARDIN, I.R. Enzymatic Scouring of Cotton-Surfactants, Agitation, and Selection of Enzymes,**Textile Chemist and Colorist**, Vol. 30(9), pp.23-29, 1998b.

LISBOA, S. A. A. **A organização da indústria têxtil brasileira no contexto internaciona**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

LOSONCZI, A. et al. Bleachability and Dyeing Properties of Biopretreated and Conventionally Scoured Cotton Fabrics. **Textile Research Journal**, v. 74, n. 6, p. 501–508, 2 jun. 2004.

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

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.

MATTHEWS, K. **Pretreatment of Textile Substrates**. [s.l.] Woodhead Publishing India, 2019. MCLOUGHLIN, J.; MITCHELL, A. Fabric Finishing. In: **Textiles and Fashion**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 379–411.

MOJSOV, K. **Biotechnological applications of pectinases in textile processing and bioscouring of cotton fibers**. II International Conference Industrial Engineering and Environmental Protection 2012. **Anais...**Zrenjanin, Sérvia: 2012. Disponível em: [https://eprints.ugd.edu.mk/2221/1/Biotechnological applications of pectinases in textile processing and bioscouring of cotton fibers.pdf](https://eprints.ugd.edu.mk/2221/1/Biotechnological_applications_of_pectinases_in_textile_processing_and_bioscouring_of_cotton_fibers.pdf)

MOJSOV, K. Enzymatic desizing, bioscouring and enzymatic bleaching of cotton fabric with glucose oxidase. **The Journal of The Textile Institute**, v. 110, n. 7, p. 1032–1041, 3 jul. 2019.

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, 26 jan. 2015.

ANIAZ, A.; MALIK, Q. J.; MUHAMMAD, S.; SHAMIM, T.; ASGHAR, S. **Bioscouring of cellulosic textiles**. **Coloration Technology**, v. 127, n. 4, p. 211–216, 2011.

NTULI, F. et al. **Characterization of effluent from textile wet finishing operations**. Proceedings of the world congress on engineering and computer science I. **Anais...**San Francisco, USA: Newswood Limited, 2009

OLIVEIRA, M. A. **Resolução Enzimática de Álcoois Secundários**. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

PANDA, S. K. B. C.; SEN, K.; MUKHOPADHYAY, S. Sustainable pretreatments in textile wet processing. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, p. 129725, dez. 2021.

PERIYASAMY, A. P.; TEHRANI-BAGHA, A. A review on microplastic emission from textile materials and its reduction techniques. **Polymer Degradation and Stability**, v. 199, p. 109901, maio 2022.

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.

PONNUSAMI, V.; GUNASEKAR, V.; SRIVASTAVA, S. N. Kinetics of methylene blue removal from aqueous solution using gulmohar (*Delonix regia*) plant leaf powder: Multivariate regression analysis. **Journal of Hazardous Materials**, v. 169, n. 1–3, p. 119–127, set. 2009.

POWER, E. J. Yarn to Fabric. In: **Textiles and Fashion**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 289–305.

PREŠA, P.; FORTE TAVČER, P. Low Water and Energy Saving Process for Cotton Pretreatment. **Textile Research Journal**, v. 79, n. 1, p. 76–88, 1 jan. 2009.

RADHAKRISHNAN, S. Application of Biotechnology in the Processing of Textile Fabrics. In: [s.l: s.n.]. p. 277–325.

RAHMAN, M. et al. The use of biotechnologies in textile processing and environmental sustainability: An emerging market context. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 159, p. 120204, out. 2020.

RAJENDRAN, R. et al. Bioscouring of Cotton Fabrics using Pectinase Enzyme its Optimization and Comparison with Conventional Scouring Process. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 14, n. 9, p. 519–525, 15 abr. 2011.

RAJENDRAN, R. et al. Bioscouring of Cotton Fabrics using Pectinase Enzyme its Optimization and Comparison with Conventional Scouring Process. **Pakistan Journal of Biological Sciences**, v. 14, n. 9, p. 519–525, 15 abr. 2011.

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.

RAMASANY, R.; AHMED, H.; KARTHIK, S. Development of microbial consortium for the biodegradation and biodecolorization of textile effluents. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 6, n. 1, p. 36–41, 30 jun. 2012.

REIS, C. Z. DOS. **Bioalvejamento enzimático de tecidos de malha de algodão**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

ROCKY, A. M. K. B. P. Comparison of effectiveness between conventional scouring e bio-scouring on cotton fabrics. **Internation Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 3, n. 8, p. 1–5, 2012.

ROSSNER, U. *Melliand Textilberichte*, Vol.74, pp.144, 1993.

ROY CHOUDHURY, A. K. Sustainable Textile Wet Processing: Applications of Enzymes. In: [s.l: s.n.]. p. 203–238.

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.

SANTI, L. **Produção, Caracterização e Aplicação de Preparados Pectinolíticos Produzidos por *Penicillium oxalicum* Utilizando Resíduos Agroindustriais**. 2005. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Programa de Pós-graduação em Biologia Celular e Molecular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SAXENA, S.; RAJA, A. S. M.; ARPUTHARAJ, A. Challenges in Sustainable Wet Processing of Textiles. In: [s.l: s.n.]. p. 43–79.

SHAHID, M. et al. Enzymatic processing of natural fibres: white biotechnology for sustainable development. **Green Chemistry**, v. 18, n. 8, p. 2256–2281, 2016.

SHARMA, N. et al. A highly alkaline pectate lyase from the Himalayan hot spring metagenome and its bioscouring applications. **Process Biochemistry**, v. 115, p. 100–109, abr. 2022.

SILVA, L. A. D. **Produção e Caracterização de Enzimas Celulósicas por *Aspergillus phoenicis***. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Microbiologia Agrícola e do Ambiente – Programa Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola e do Ambiente, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SINCLAIR, R. **Textiles and Fashion**. [s.l.] Elsevier, 2015.

SINGH, A. et al. A sustainable and green process for scouring of cotton fabrics using xylano-pectinolytic synergism: switching from noxious chemicals to eco-friendly catalysts. **3 Biotech**, v. 8, n. 4, p. 184, 15 abr. 2018.

SINGH, A. et al. Eco-friendly scouring of ramie fibers using crude xylano-pectinolytic enzymes for textile purpose. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 6, p. 6701–6710, 24 fev. 2020.

STANKARD, S. Yarn to Fabric. In: **Textiles and Fashion**. [s.l.] Elsevier, 2015. p. 255–287.

SUDBRACK, T. S. **Imobilização de Lipase em Montmorilonita e Aplicação em Reações Oleoquímicas**. 2012. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

TAN, H.; CAO, Y. Effects of Cellulase on the Modification of Cellulose. **Carbohydrate Research**, S. L., v. 337, p.1291-1296, 2002.

TANAPONGPIPAT, A. et al. Process modification in the scouring process of textile industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 1, p. 152–158, jan. 2008.

TAVČER, P. F. Biotechnology in Textiles: an Opportunity of Saving Water. In: EINSCHLAG, F. S. G. (Comp.). **Waste Water: Treatment and Reutilization**. S. L.: Intech, 2011. Cap. 20, p. 387-404.

TEERI, T. T.; Crystalline cellulose degradation: new insight into the function of cellobiohydrolases', *Trends Biotechnol*, 15(5), 160–167. doi: 10.1016/S0167-7799(97)01032-9, 1997.

TOPRAK, T.; ANIS, P. Combined one-bath desizing–scouring–depilling enzymatic process and effect of some process parameters. **Cellulose**, v. 24, n. 1, p. 383–394, 22 jan. 2017.

TRAORE, M.K.; BUSCHLE-DILLER, G. Environmentally Friendly Scouring Processes, **Textile Chemist and Colorist&American Dyestuff Reporter**, Vol.32(12), pp.40-43, 2000

TZANOV, T. et al. Bio-preparation of cotton fabrics. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 29, n. 6–7, p. 357–362, out. 2001.

TZANOV, T.; CALAFELL, M.;GUEBITZ, G.M.;CAVACO-PAULO, A., Bio-preparation of cotton fabrics, **Enzyme and Microbial Technology**, Vol.29, pp.357-362, 2001.

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

UL-HAQ, N.; NASIR, H. Cleaner production technologies in desizing of cotton fabric. **Journal of the Textile Institute**, p. 1–8, 9 jun. 2011.

VARADARAJAN, G.; VENKATACHALAM, P. Sustainable textile dyeing processes. **Environmental Chemistry Letters**, v. 14, n. 1, p. 113–122, 8 mar. 2016.

VASCONCELOS, A. J. C. **Obtenção de Tecidos de Poliéster de Baixo Peso por Tratamento Enzimático**. 2005. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Têxtil, Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Braga, 2005.

VIGNESWARAN, C.; ANANTHASUBRAMANIAM, M.; ANBUMANI, N. Neural Network Approach for Optimizing the Bioscouring Performance of Organic Cotton Fabric through Aerodynamic System. **Journal of Textile and Apparel, Technology and Management**, S. L. v. 7, p.01-26, 2012.

VIGO, T. L. **Textile Processing and Properties Preparation, Dyeing, Finishing and Performanc**. [s.l.] Elsevier, 2013.

VISHNOI, N.; DIXIT, S.; MISHRA, J. Microbial Lipases and Their Versatile Applications. In: [s.l: s.n.]. p. 207–230.

VONDERWULBECKE, T.; KIESLICH, K.; ERDMANN, H. Comparison of lipases by different assays. **Enzyme Microbial Technology**, S. L., v. 14, p.631-639, 1992.

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, fev. 2007.

WAKELYN, P. J. et al. Cotton Fiber Química e Tecnologia. Boca Raton: CRC Press, 2006. 176 p.

XIA, Z. et al. Experimental Investigation on the Effect of Singeing on Cotton Yarn Properties. **Textile Research Journal**, v. 79, n. 17, p. 1610–1615, 18 nov. 2009.

YAN, N. et al. One-Step Conversion of Cellobiose to C 6 -Alcohols Using a Ruthenium Nanocluster Catalyst. **Journal of the American Chemical Society**, v. 128, n. 27, p. 8714–8715, 1 jul. 2006.