
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE AMERICANA “Ministro Ralph Biasi”
Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil

SAMANTHA MARIA DE OLIVEIRA

ESTUDO DAS APLICAÇÕES DE ENZIMAS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

AMERICANA, SP

2025

SAMANTHA MARIA DE OLIVEIRA

ESTUDO DAS APLICAÇÕES DE ENZIMAS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido em cumprimento à exigência curricular do Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil pelo CEETEPS/Faculdade de Tecnologia – FATEC/ Americana.

Área de concentração: Beneficiamento Têxtil

Orientador: Prof. Dr. João Batista Giordano.

AMERICANA, SP

2025

OLIVEIRA, Samantha Maria de

Estudo das aplicações de enzimas na indústria têxtil. / Samantha Maria de Oliveira – Americana, 2025.

83f.

Estudo de caso (Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil) - - Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

Orientador: Prof. Dr. João Batista Giordano

1. Beneficiamento têxtil 2. Biotecnologia 3. Tecnologia têxtil. I. OLIVEIRA, Samantha Maria de II. GIORDANO, João Batista III. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi

CDU: 677027

579:332.6

677

Elaborada pelo autor por meio de sistema automático gerador de ficha catalográfica da Fatec de Americana Ministro Ralph Biasi.

SAMANTHA MARIA DE OLIVEIRA

ESTUDO DAS APLICAÇÕES DE ENZIMAS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Trabalho de graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil pelo Centro Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana - Ralph Biasi.

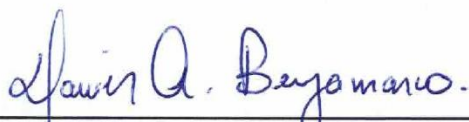
Área de concentração: Beneficiamento Têxtil

Americana, 04 de dezembro de 2025

Banca Examinadora:



Prof. Dr. João Batista Giordano (Presidente)
Doutor em Engenharia Química
Faculdade de Tecnologia de Americana, SP



Daives Arakem Bergamasco (Membro)
Doutor
Faculdade de Tecnologia de Americana, SP



Miguel Ronaldo Galhane (Membro)
Especialista
Faculdade de Tecnologia de Americana,

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade e pela força concedida para a concretização desta conquista.

A minha mãe, pela dedicação, apoio constante e incentivo em cada etapa da minha vida, que foram fundamentais para meu crescimento pessoal e acadêmico.

Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Dr. João Batista Giordano, pela paciência, dedicação e orientação ao longo desta jornada. Sua constante disponibilidade e comprometimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento acadêmico. Sempre demonstrando profundo amor pela profissão e exemplar dedicação, foi uma inspiração para mim durante toda a graduação

Aos professores da Faculdade de Tecnologia de Americana “Ministro Ralph Biasi”, do curso de Produção Textil, que, de diferentes formas — seja em sala de aula, em diálogos informais ou pelo exemplo de vida — deixaram ensinamentos valiosos para minha formação.

E aos colegas de graduação, pela amizade construída e pela convivência que enriqueceu essa caminhada acadêmica.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho, pela generosidade em compartilhar saberes e pela paciência em ensinar. Suas contribuições foram valiosas e ultrapassaram o cotidiano, tornando-se parte do meu crescimento pessoal e da construção deste trabalho.

*Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido.
Agora é hora de compreender mais, para temer
menos.” (Marie Curie)*

RESUMO

A indústria têxtil se caracteriza pelo alto consumo de água, energia e substâncias químicas, o que acarreta impactos ambientais significativos durante suas etapas produtivas. Em busca de alternativas mais sustentáveis, este estudo teve como objetivo analisar o uso de enzimas em processos têxteis, apresentando-as como substitutas potenciais aos métodos químicos convencionais. A pesquisa foi realizada a partir de revisão bibliográfica e de experimentos práticos que abordaram a aplicação de amilases e catalases em etapas como desengomagem e alveamento. Foram avaliadas as condições ideais de atuação dessas enzimas, considerando variáveis como pH, temperatura e tempo de reação, a fim de compreender sua influência na eficiência dos tratamentos. Os resultados mostraram que os processos enzimáticos preservam melhor as fibras, reduzem o consumo de água e de produtos químicos e promovem operações mais rápidas e ambientalmente adequadas. O uso de enzimas representa uma alternativa viável e estratégica para a modernização da indústria têxtil, com impactos positivos tanto ambientais quanto econômicos.

Palavras-chave: enzimas; beneficiamento têxtil; sustentabilidade

ABSTRACT

The textile industry is characterized by its high consumption of water, energy, and chemical substances, which leads to significant environmental impacts throughout its production stages. Seeking more sustainable alternatives, this study aimed to analyze the use of enzymes in textile processes, presenting them as potential substitutes for conventional chemical methods. The research was carried out through a literature review and practical experiments involving the application of amylases and catalases in stages such as desizing and bleaching. The ideal conditions for enzyme activity were evaluated, considering variables such as pH, temperature, and reaction time, in order to understand their influence on treatment efficiency. The results showed that enzymatic processes better preserve fibers, reduce water and chemical consumption, and promote faster and more environmentally friendly operations. The use of enzymes represents a viable and strategic alternative for the modernization of the textile industry, with positive environmental and economic impacts.

Keywords: industrial enzymes; textile processing; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das empresas do setor Textil no Brasil	15
Figura 2 - Cadeia de produção têxtil	16
Figura 3 - Hieróglifos Egípcios uso de processo fermentativo	22
Figura 4 - Aplicações da bactéria <i>Bacillus Subtilis</i>	24
Figura 5 - Representação tridimensional de uma enzima	25
Figura 6 - Representação esquemática do complexo enzima-substrato.....	26
Figura 7 - Comparação da energia de ativação sem enzimas e com enzimas	26
Figura 8 - Esquema gráfico da conversão de substrato em produto.....	27
Figura 9 - Mecanismo de ação enzimática.....	28
Figura 10 - Esquema de funcionamento de enzimas com cofatores.	30
Figura 11 - Curva de saturação numa reação enzimática.....	31
Figura 12 - Representação da influencia do pH na atividade enzimática.....	32
Figura 13 - Gráfico demonstrando a influência da temperatura e a atividade enzimática.....	33
Figura 14 - Modelo de ligação enzima coenzima e substrato.	36
Figura 15 - Classificação das enzimas segundo Classificação das enzimas segundo Comissão Internacional de Enzimas	39
Figura 16 - Esquema de inibição competitiva enzimática	40
Figura 17 - Esquema de inibição não competitiva enzimática	40
Figura 18 - Representação comparativa entre inibição e ativação alostérica	43
Figura 19 - Fluxograma de aplicações das enzimas na industria têxtil	46
Figura 20 - Representação enzima Alfa amilase.....	48
Figura 21 - Esquema de hidrolise de dextrina.....	48
Figura 22 - Representação enzima Celulase	49

Figura 23 - Representação enzima Pectinase	51
Figura 24 - Representação enzima Catalase	53
Figura 25 - Representação enzima Protease.....	54
Figura 26 - Escala Tegewa	65
Figura 27 - Identificação da presença de amido no tecido a ser utilizado	69
Figura 28 - Identificação da presença de PVAOH no tecido a ser utilizado	70
Figura 29 - Medição do grau de brancura das amostras por espectrofotometria..	75
Figura 30 - Realização de teste utilizando Quantofix Peroxid 25	76
Figura 31 - Resultados do teste QUANTOFIX® Peroxide 25 para as amostras 01 a 06, dispostas da direita para a esquerda.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das enzimas alfa-amilases	49
Tabela 2 - Características das enzimas Celulases	50
Tabela 3 - Características das enzimas Pectinases.....	52
Tabela 4 - Características das enzimas Catalases	53
Tabela 5 - Características das enzimas Proteases	54
Tabela 6 - Tabela 06 Características das enzimas Lacase.....	55
Tabela 7 - Avaliação de presença de PVAOH através de conceito	66
Tabela 8 - Receita de Desengomagem.....	68
Tabela 9 - Parâmetros de pH e temperatura aplicados nos experimentos.....	70
Tabela 10 - Resultados de carga de goma (%).....	70
Tabela 11 - Resultados de presença de amido (gota superior) e PVAOH (gota inferior) após os testes de desengomagem.	71
Tabela 12 - Avaliação Tegewa e PVAOH	71
Tabela 13 - Receita de Alveamento	74
Tabela 14 - Concentração de enzima catalase aplicada em cada amostra	75
Tabela 15 - Valores encontrados de ΔCIE	75
Tabela 16 - Valores de concentração de peróxido de hidrogênio nas amostras, determinados pelo teste QUANTOFIX® Peroxide 25.	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	A INDUSTRIA TÊXTIL	14
3	PROCESSOS DA CADEIA TÊXTIL.....	16
4	APLICAÇÕES QUÍMICAS NO BENEFICIAMENTO TÊXTIL	18
5	PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO TÊXTIL	20
5.1	Beneficiamento Primário	20
5.2	Beneficiamento Secundário	21
5.3	Beneficiamento Final.....	21
6	ENZIMAS	22
6.1	História das enzimas	22
6.2	O que são enzimas	25
6.2.1	Modelos de interação enzima- substrato	29
6.2.2	Cinética enzimática	30
6.2.3	Influência do pH	32
6.2.4	Influência da Temperatura	32
6.2.5	Influência da concentração dos substratos	33
6.2.6	Influência do tempo	33
6.2.7	Influência de cofatores, coenzimas e inibidores.....	34
6.2.8	Cofatores, Coenzimas e Isoenzimas.....	35
6.2.9	Vantagens e limitações no uso de enzimas	37
6.3	Classificação das enzimas	38
6.4	Inibidores enzimático	39
6.5	Processo produtivo das enzimas.....	42
6.6	Mercado e aplicações industriais das enzimas	44
6.6.1	Industria alimentícia	44
6.6.2	Industria farmacêutica e de cosmético	45
6.6.3	Industria Papel e Celulose	45
6.6.4	Industria de saneantes.....	45
6.6.5	Industria têxtil	46
7	PRINCIPAIS ENZIMAS UTILIZADAS NO BENEFICIAMENTO TÊXTIL	48
7.1	Amilase.....	48
7.2	Celulase.....	49

7.3	Pectinase	51
7.4	Catalase	52
7.5	Protease	53
7.6	Lacase	54
8	PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO TEXTÉIS TRAdicionAIS VERSUS ENZIMÁTICOS	56
8.1	Purga	56
8.1.1	Purga Tradicional.....	56
8.1.2	Purga enzimática (Biopurga).....	56
8.2	Desengomagem	57
8.2.1	Desengomagem tradicional	58
8.2.2	Desengomagem enzimática.....	59
8.3	Alveijamento	60
8.3.1	Alveijamento tradicional	60
8.3.2	Alveijamento enzimático	61
8.4	Estonagem	62
8.4.1	Estonagem tradicional.....	62
8.4.2	Estonagem enzimática.....	62
9	PARTE EXPERIMENTAL	64
9.1	Testes com o Tecido engomado	64
9.1.1	Produção de Indicador de Amido	64
9.1.2	Produção de Indicador de PVAOH.....	65
9.1.3	Teste de desengomagem	67
9.1.4	Resultados dos testes com o tecido engomado.....	69
9.2	Testes de Alveijamento	73
9.2.1	Alveijamento	73
9.2.2	Determinação de concentração de peróxido de hidrogênio com QUANTOFIX® Peroxide 25.....	74
9.2.3	Resultados dos testes de alveijamento.....	75
10	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Os processos têxteis, tradicionalmente, fazem uso intensivo de água, energia e reagentes químicos, resultando em efluentes de elevada carga orgânica e inorgânica, que trazem sérios impactos ambientais. Diante da crescente demanda por soluções ambientalmente responsáveis, torna-se urgente a adoção de tecnologias que conciliem eficiência produtiva e redução de danos ecológicos. Nesse contexto, a aplicação de enzimas no beneficiamento têxtil tem se destacado como alternativa mais econômica e sustentável (Araújo, 2022).

As enzimas são macromoléculas, geralmente proteicas, que atuam como catalisadores biológicos, acelerando reações químicas sem serem consumidas. Produzidas majoritariamente por microrganismos via fermentação, podem ser obtidas a partir de matérias-primas acessíveis e sem dependência de fatores sazonais (Giordano, 2012).

Identificadas pelo sufixo “ase” (como amilase, celulase e catalase), cada enzima apresenta especificidade por determinado substrato e opera segundo o modelo chave-fechadura, formando um complexo temporário que facilita a transformação química e libera o produto, mantendo-se disponível para novos ciclos catalíticos.

A atividade enzimática é condicionada por variáveis físico-químicas como temperatura, pH e concentração de substrato; desvios dessas faixas ótimas podem causar desnaturação ou saturação e comprometer a eficiência catalítica.

Nos últimos anos, a biotecnologia enzimática tem se consolidado na indústria têxtil, substituindo reagentes agressivos e oferecendo processos mais seletivos, eficientes e sustentáveis; enzimas como amilases, celulasas, lacases e lipases já são aplicadas em etapas como desengomagem, alvejamento, biopolimento, bioestonagem e tratamento de efluentes (Giordano, 2012).

O presente trabalho tem como objetivo estudar as aplicações de enzimas na indústria têxtil, por meio de revisão bibliográfica e testes práticos, avaliando variáveis como pH e temperatura e como estas influenciam a eficácia dos processos. Os resultados obtidos evidenciam que a operação dentro das condições ideais de atividade enzimática potencializa o rendimento, otimiza o uso de recursos e promove práticas industriais mais sustentáveis.

2 A INDÚSTRIA TÊXTIL

A tecelagem é uma das práticas mais antigas da humanidade, com registros que remontam ao período neolítico, cerca de doze mil anos atrás. Inicialmente, o ser humano manipulava fibras vegetais com as mãos, criando estruturas rudimentares para proteção e abrigo. Essa prática evoluiu para a cestaria e, posteriormente, para os primeiros tecidos, por meio do entrelaçamento de fios (Pezzolo, 2007).

Com o avanço das civilizações, a tecelagem se expandiu para regiões como Egito, Índia e China, onde passou a ter valor comercial e cultural. Com o passar do tempo, novas técnicas foram desenvolvidas, permitindo a criação de padrões, texturas e composições variadas, influenciadas pelas escolhas dos materiais e dos tratamentos utilizados.

Um marco decisivo ocorreu durante a Revolução Industrial, no século XVIII, com a introdução da mecanização. Invenções como a máquina de fiar de James Hargreaves (1764) e o tear mecânico de Edmund Cartwright (1785) transformaram profundamente o setor, ampliando a produtividade e consolidando a indústria têxtil como protagonista da industrialização global (World History, 2023).

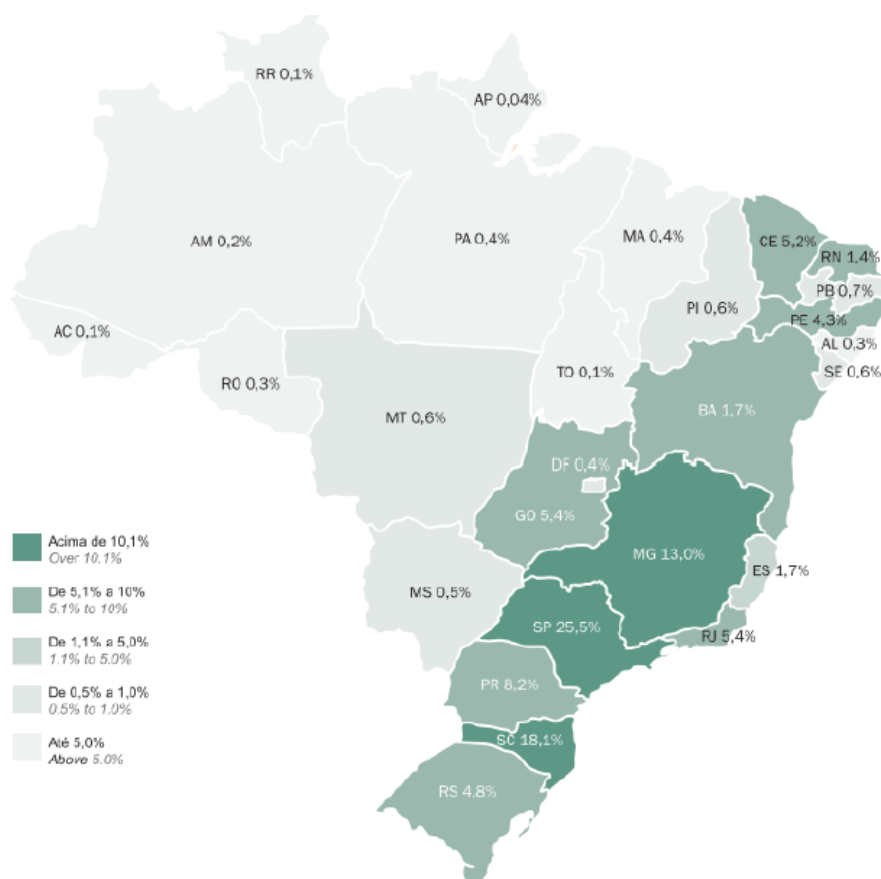
No Brasil, a indústria têxtil desempenhou papel central na industrialização nacional, especialmente entre o final do século XIX e meados do século XX. O país tornou-se um dos poucos no mundo com produção completa em toda a cadeia têxtil, desde a fiação até a confecção.

Conforme informações da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT, Perfil do Setor, 2024), atualmente, o setor têxtil e de confecção brasileiro ocupa a quinta posição mundial em volume de produção, com faturamento anual estimado em R\$ 221 bilhões. Emprega diretamente cerca de 1,31 milhão de trabalhadores, distribuídos em mais de 25 mil empresas, concentradas principalmente no sul, sudeste e nordeste do país. Em 2025, o setor registrou crescimento de 9% em 12 meses, com destaque para a tecelagem (exceto malha), que apresentou aumento de 32,8% no primeiro semestre.

Conforme Figura 1, que mostra a distribuição das empresas do setor Têxtil no Brasil, o setor Têxtil e de Confecção apresenta maior concentração nas regiões Sudeste e Sul, especialmente em estados como São Paulo, Santa Catarina e Minas

Gerais. No entanto, observa-se uma gradual expansão para outras regiões, como o Nordeste, impulsionada por incentivos fiscais e custos operacionais mais baixos (PIMENTEL, 2025).

Figura 1 - Distribuição das empresas do setor Textil no Brasil



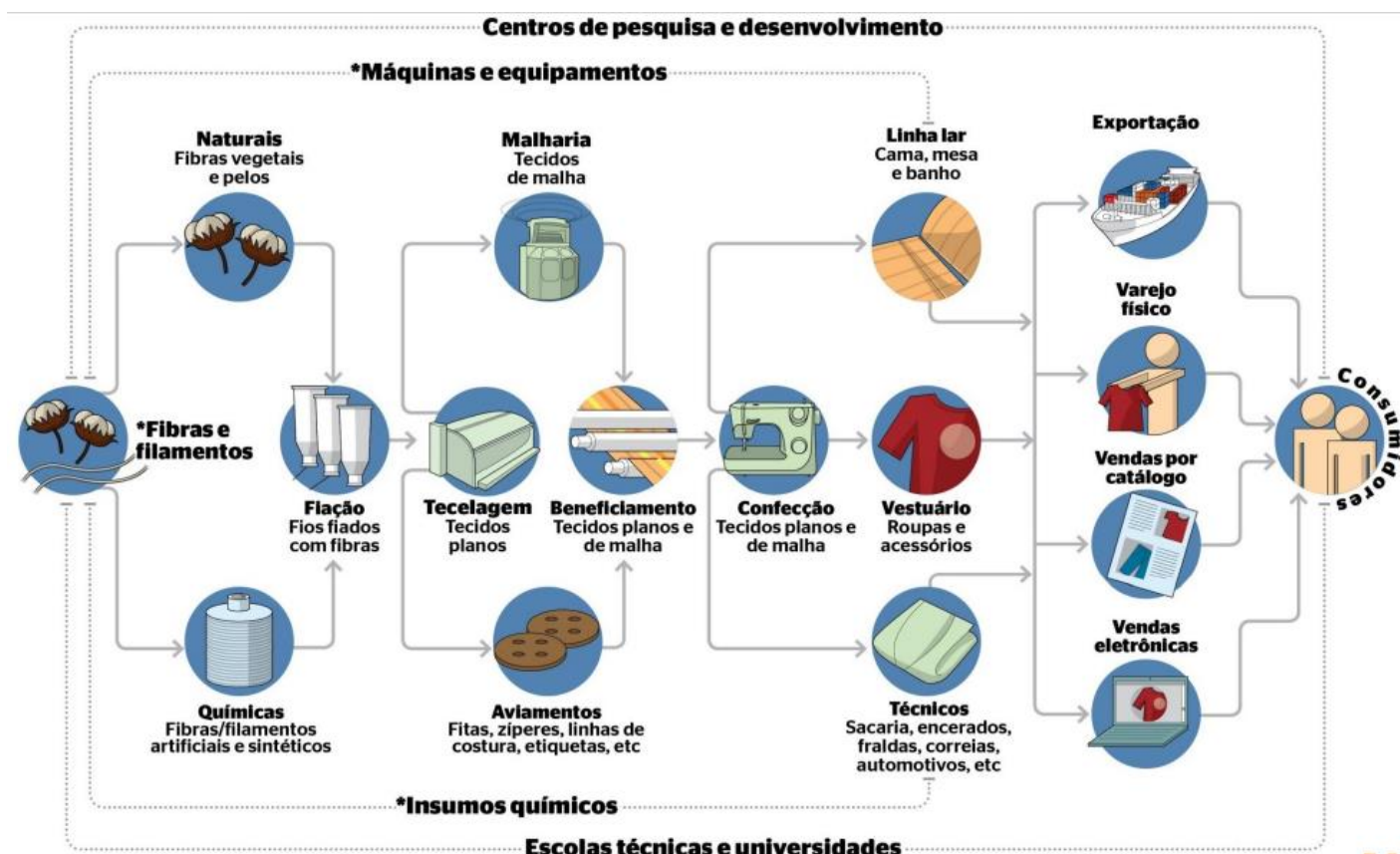
Fonte: Pimentel, Fernando V. (2025)

Frente aos desafios contemporâneos, como a sustentabilidade e a competitividade internacional, a indústria têxtil brasileira tem investido em inovação tecnológica, economia circular e capacitação profissional. A parceria com a indústria química é estratégica nesse processo, viabilizando soluções menos poluentes e mais eficientes. Com uma base produtiva sólida e diversificada, o Brasil mantém posição relevante no cenário global, embora enfrente pressões por modernização e redução de custos. O futuro do setor depende da integração entre inovação, responsabilidade ambiental e valorização da mão de obra qualificada.

3 PROCESSOS DA CADEIA TÊXTIL

A cadeia produtiva têxtil é composta por uma série de etapas interligadas que transformam fibras em produtos acabados, como roupas, tecidos técnicos e artigos para o lar. Uma visão geral desse processo pode ser observada na Figura 2 (Pimentel, 2025).

Figura 2 - Cadeia de produção têxtil



Fonte: Pimentel, Fernando V. (2025)

Esse processo inicia-se com a produção de matéria-prima, que pode ser de origem natural (como algodão, lã e seda), artificial (como viscose) ou sintética (como poliéster e poliamida). No Brasil, o algodão é a principal fibra utilizada, representando cerca de 65% da matéria-prima têxtil (Pimentel, 2025).

A etapa seguinte é a fiação, responsável por transformar as fibras em fios por meio de processos mecânicos e químicos. Esses fios, são então direcionados à tecelagem ou malharia, onde são entrelaçados para formar tecidos planos ou de malha. A

tecelagem utiliza teares modernos que variam conforme o tipo de fio e o padrão desejado. Já a malharia é mais flexível e voltada à produção de tecidos com maior elasticidade.

Após a formação do tecido, ocorre o beneficiamento ou acabamento, que inclui processos como alveamento, tingimento, estamparia e aplicação de tratamentos especiais (antimicrobianos, impermeabilizantes, entre outros). Essa etapa é fundamental para conferir ao tecido características estéticas e funcionais, além de prepará-lo para a confecção. A indústria química desempenha papel essencial nesse momento, fornecendo corantes, resinas, solventes e enzimas que garantem qualidade e desempenho ao produto final (SENAI-SP, 2015).

Por fim, os tecidos beneficiados seguem para a confecção, onde são cortados e costurados para se tornarem peças de vestuário ou outros produtos têxteis que são vendidos aos consumidores finais. O Brasil é considerado a maior cadeia têxtil completa do Ocidente, pois possui todas essas etapas desenvolvidas internamente, sem depender de importações para a produção de bens têxteis (ABIT, Perfil do Setor, 2024).

4 APLICAÇÕES QUÍMICAS NO BENEFICIAMENTO TÊXTIL

A indústria química é essencial para a cadeia têxtil, especialmente nas etapas de preparação e acabamento dos tecidos. Produtos químicos são empregados em processos como fiação, engomagem, desengomagem, purga, alveamento, tingimento, estamparia e diversos tipos de acabamento. Enzimas, umectantes, corantes, solventes, resinas e agentes de fixação são desenvolvidos com o objetivo de conferir durabilidade, estética e funcionalidade aos produtos têxteis. O desenvolvimento e aprimoramento desses insumos e processos produtivos contribuem para a melhoria do aspecto dos substratos, o aumento da produtividade e a viabilização de práticas mais sustentáveis no setor (Cavaco-Paulo; Gübitz, 2003).

Durante a história, diversos compostos químicos utilizados na produção têxtil revelaram-se tóxicos ao ser humano e ao meio ambiente. No início do século XIX, os inventores Wilhelm Sattler e Friedrich Russ desenvolveram um pigmento verde mais estável para o tingimento de tecidos. O corante, conhecido como Verde de Paris, tornou-se extremamente popular durante a era vitoriana por seu tom vibrante. No entanto, sua composição incluía acetoarsenito de cobre — uma combinação de acetato de cobre e compostos de arsênio — altamente tóxica. Embora insolúvel em água, o pigmento pode liberar compostos de arsênio perigosos, como o trióxido de arsênio, especialmente em ambientes ácidos ou por decomposição química. Essa toxicidade causava desmaios, vômitos, lesões cutâneas, câncer e até envenenamentos fatais. Casos como esse impulsionaram reformas na regulação dos produtos químicos utilizados na indústria (Esquire, 2024).

Atualmente, compostos como formaldeídos, nonilfenóis e metais pesados estão sujeitos a rigorosas regulamentações no setor têxtil, por meio de iniciativas como o programa ZDHC (Zero Discharge of Hazardous Chemicals) e o protocolo AFIRM, que visam eliminar substâncias perigosas da cadeia produtiva.

A indústria têxtil é uma das mais impactantes ambientalmente, devido ao elevado consumo de água e ao uso intensivo de produtos químicos. Para a produção de um quilo de tecido acabado, são utilizados mais de 100 litros de água, principalmente nas etapas de lavagem, tingimento e acabamento. O descarte inadequado desses efluentes pode comprometer corpos d'água e ecossistemas locais (Araújo, 2022).

Diante desse cenário, cresce a adoção de práticas sustentáveis e a busca pelo desenvolvimento de tecnologias limpas, que visam reduzir os impactos ambientais da cadeia produtiva. Pesquisas científicas e inovações industriais têm se concentrado na substituição de insumos tóxicos por alternativas biodegradáveis, na reutilização de água e na aplicação de processos enzimáticos, promovendo uma produção mais segura e responsável.

5 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO TÊXTIL

De acordo com Pezzolo (2007), o processo de beneficiamento têxtil busca melhorar as características físico-química dos substratos (que podem ser fibras, fios, tecidos, não tecidos, etc.).

O beneficiamento têxtil é classificado em 3 tipos: beneficiamento primário, beneficiamento secundário e beneficiamento final.

5.1 Beneficiamento Primário

São os tratamentos que visam colocar o substrato em condições de receber o tingimento e o acabamento final.

Conforme Araújo (2022), o beneficiamento primário utiliza operações físicas, químicas, bioquímicas ou físico-químicas.

As operações físicas, são procedimentos que promovem melhorias no substrato têxtil por meio de ações exclusivamente físicas sem o uso de reagentes químicos.

Destacam-se como operações físicas a chamuscagem, que elimina fibras soltas da superfície do tecido; a navalhagem, que uniformiza a textura do material; e a prefixação, que estabiliza as dimensões do substrato antes das etapas subsequentes de tratamento.

As operações químicas, são procedimentos que envolvem reações químicas aplicadas ao substrato têxtil com o objetivo de modificar suas propriedades, removendo impurezas e preparando o substrato para etapas posteriores como tingimento e acabamento. Entre os processos químicos mais comuns no beneficiamento primário estão: a cloragem da lã, que reduz o encolhimento e proporciona a lã brilho e a capacidade de ser tingida; as desengomagens por oxidação, ácidas ou alcalinas; a limpeza a seco e a úmido, voltadas à remoção de óleos, ceras e sujeiras; e o alvejamento, que clareia o tecido e uniformiza sua aparência (Giordano, 2011).

As operações bioquímicas, como o nome já sugere utiliza apenas meios bioquímicos, como a desengomagem enzimática e desengomagem por auto fermentação.

Já as operações físico-químicas usam simultaneamente operações físicas e químicas na busca de melhorar os substratos têxteis, alguns tratamentos físico-químicos são a mercerização que melhora brilho, resistência, absorção e uniformidade do tecido, otimizando sua qualidade para tingimento e uso final; a caustificação e a feltragem (Giordano, 2011).

5.2 Beneficiamento Secundário

É a etapa do beneficiamento que proporciona colocação ao substrato, seja de forma total, por meio do tingimento, ou parcial, através da estamparia. Essa etapa é responsável por definir a aparência visual do tecido, agregando valor estético e funcional (Araújo, 2022).

5.3 Beneficiamento Final

Após o beneficiamento secundário, segundo Giordano (2011), o substrato passa por processos de acabamento final, que têm como objetivo, melhorar suas características como aspecto físico, toque e brilho. Esses tratamentos podem ser físicos ou químicos, sendo aplicados por métodos como foulardagem, esgotamento ou pulverização.

Entre os acabamentos químicos, destacam-se o amaciamento, que proporciona maciez ao tecido; o encorpamento, que aumenta sua rigidez por meio de espessantes naturais ou resinas; além da impermeabilização, dos acabamentos antifogo, antipilling e antiestáticos, que conferem maior desempenho e durabilidade. Já entre os acabamentos físicos, estão o pré-encolhimento, a calandragem, a flanelagem e a lixagem.

6 ENZIMAS

6.1 História das enzimas

As enzimas têm sido utilizadas desde tempos antigos, pastores da Antiguidade perceberam que o leite armazenado no estômago de animais sacrificados se transformava em uma substância sólida, o queijo. Registros históricos, como os de Plínio, mencionam práticas rudimentares de coagulação do leite utilizando plantas, como a figueira, que contêm enzimas naturais, como a ficina. Civilizações como egípcios (Figura 3), assírios e babilônios já dominavam processos fermentativos há milênios, assim como mostrado utilizando microrganismos para produzir vinho e cerveja (Zille, 2014).

Figura 3 - Hieróglifos Egípcios uso de processo fermentativo



Fonte: Zille (2014)

Conforme Zille (2014), as primeiras observações científicas relacionadas à digestão química datam de 1783, quando o italiano Lazzaro Spallanzani publicou *Dissertazioni di fisica animale e vegetabile*, descrevendo que os sucos gástricos promoviam digestão mesmo fora do estômago, estabelecendo um marco para a compreensão da ação enzimática.

Em 1814, o físico e químico alemão Gustav Robert Kirchhoff descreveu a conversão do amido em açúcares mediante aquecimento com ácido diluído, no que se considera o primeiro processo documentado de hidrólise do amido em glicose (Zille, 2014).

Em meados do século XIX, Louis Pasteur, em 1857, demonstrou e que microrganismos são responsáveis pela fermentação alcoólica, consolidando a ideia de que processos antes atribuídos ao acaso tinham base biológica. (Zille, 2014).

Segundo Monteiro e Silva (2009), em 1878 foi cunhado o termo enzima pelo químico alemão Wilhelm Kühne, ao estudar os processos de fermentação do amido em açúcares. Ele observou que certas substâncias presentes no fermento atuavam como catalisadores biológicos, acelerando reações químicas sem ser o próprio organismo vivo. Para nomear essas moléculas, Kühne combinou as palavras gregas “en” (dentro) e “zyme” (fermento), criando o termo “enzima”, que significa literalmente “dentro do fermento”.

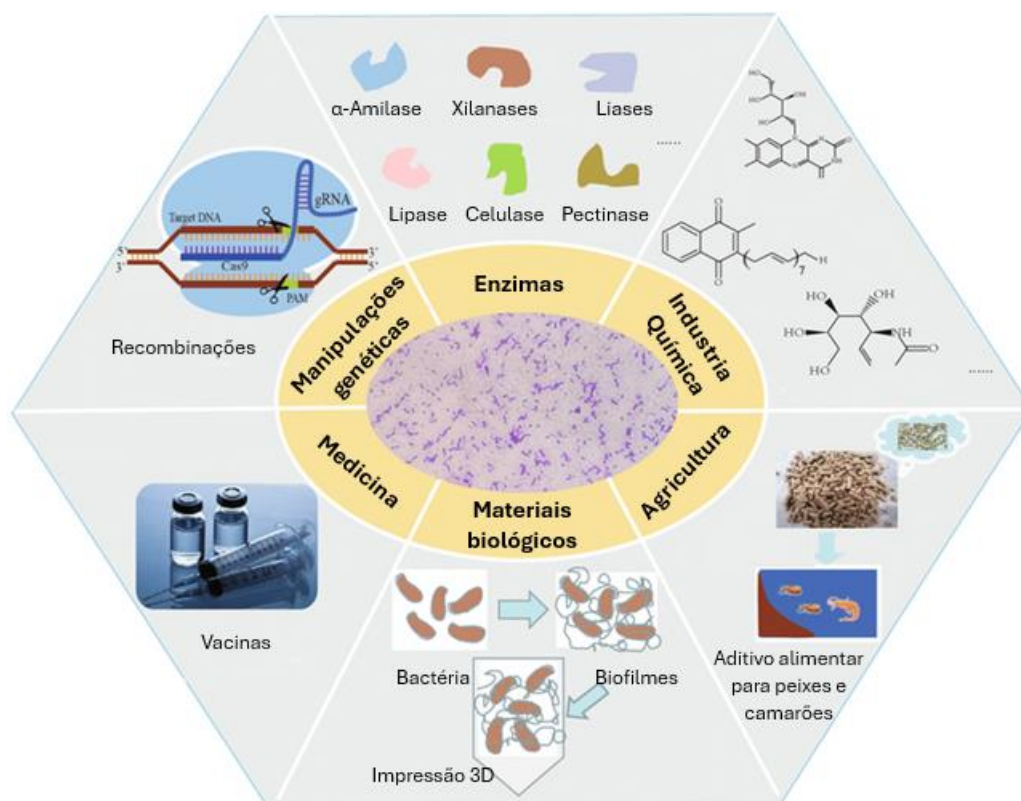
Em 1928, o bacteriologista escocês Alexander Fleming observou que o fungo *Penicillium notatum* liberava uma substância capaz de destruir bactérias como *Staphylococcus aureus*, dando origem à penicilina, o primeiro antibiótico amplamente utilizado na medicina. Embora a penicilina não seja uma enzima, ela atua inibindo a transpeptidase, uma enzima essencial para a síntese da parede celular bacteriana, impedindo o crescimento e a multiplicação das bactérias (Robinson, 2015).

Além disso, em 1922, Fleming havia identificado a lisozima, uma enzima com propriedades antimicrobianas presente em secreções humanas como muco e lágrimas, capaz de degradar a parede celular de bactérias. Essas descobertas pioneiras demonstraram como enzimas naturais e inibidores enzimáticos podem desempenhar papel importante na defesa contra microrganismos, abrindo caminho para o desenvolvimento de terapias antibacterianas (Robinson, 2015).

Na década de 1950, a empresa dinamarquesa Novo Nordisk, iniciou a produção em larga escala de enzimas utilizando a bactéria *Bacillus subtilis*. Essa bactéria é capaz de secretar proteínas de forma eficiente, tornando-se uma plataforma ideal para a fabricação de enzimas industriais, como amilases, proteases e lipases (Figura 4). Essas enzimas são amplamente aplicadas em setores como alimentos, detergentes e

farmacêuticos, e a utilização de *B. subtilis* se destaca por sua segurança e versatilidade na produção biotecnológica (SU et al., 2020).

Figura 4 Aplicações da bactéria *Bacillus subtilis*



Fonte: Figura adaptada de SU et al. (2020)

A aplicação de enzimas na indústria têxtil começou na década de 1950, quando as amilases passaram a ser utilizadas em larga escala para a remoção de amido aplicado durante a engomagem dos tecidos, processo que facilitava o tratamento e melhorava a uniformidade e a qualidade da superfície têxtil.

Nos anos 1980, as celulases começaram a ser empregadas no biopolimento de tecidos de algodão, proporcionando um acabamento mais macio. Elas também permitiram criar o efeito "stone-washed" em jeans de forma biológica, substituindo métodos químicos agressivos (Zille, 2014).

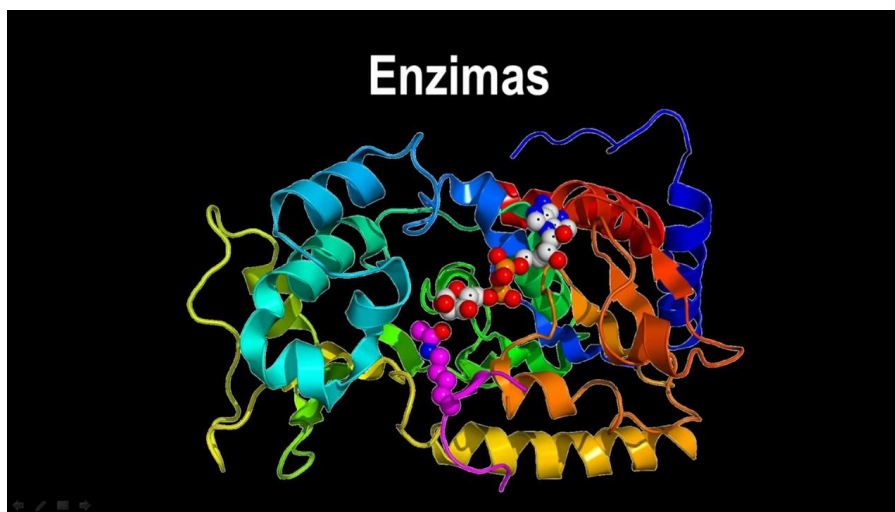
Na década de 1990, a introdução das catalases possibilitou a degradação do peróxido de hidrogênio residual após o branqueamento, reduzindo o consumo de água e tornando os processos mais sustentáveis (Zille, 2014).

Desde então, diversas outras enzimas, como proteases, lipases e lacases, passaram a ser aplicadas em diferentes etapas da produção têxtil, impulsionando a inovação, melhorando a qualidade dos tecidos e diminuindo o impacto ambiental (Araújo, 2022).

6.2 O que são enzimas

De acordo com Zille (2014), as enzimas são proteínas que funcionam como catalisadores biológicos, possuindo uma estrutura tridimensional formada por cadeias de aminoácidos como mostrado na Figura 5. Elas aceleram reações químicas e regulam processos celulares fundamentais para a manutenção da vida.

Figura 5 - Representação tridimensional de uma enzima

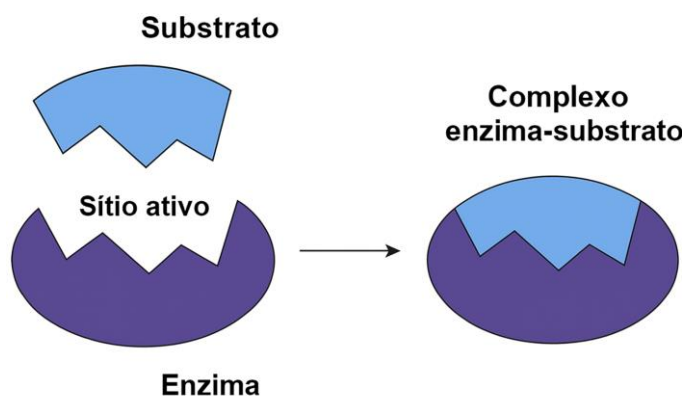


Fonte: Tarea Educativa.

A estrutura tridimensional de uma enzima é fundamental, pois determina a forma e a disposição do sítio ativo, onde ocorre a reação química. Essa conformação específica permite que a enzima reconheça e se ligue apenas ao seu substrato correto, garantindo alta especificidade e eficiência catalítica.

Conforme ilustrado na Figura 6, a interação entre a enzima e o substrato ocorre de modo altamente seletivo, resultando na formação do complexo enzima-substrato, essencial para a catálise enzimática (Lewis; Stone, 2023).

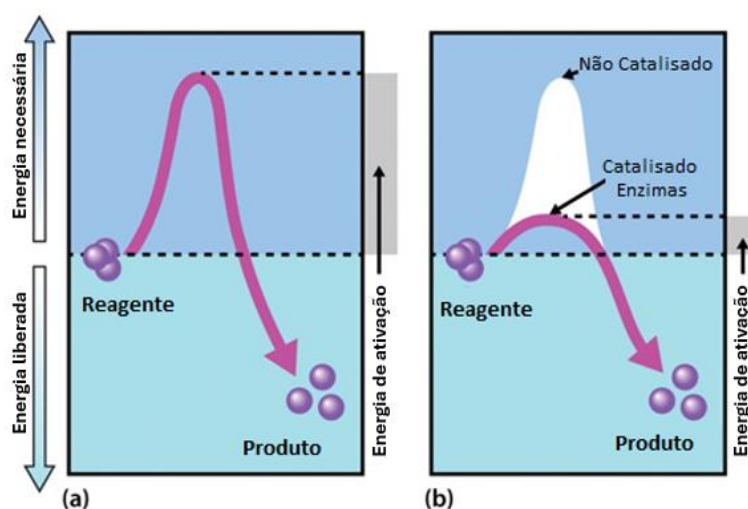
Figura 6 Representação esquemática do complexo enzima-substrato



Fonte: Lingolandedu (2024).

Um catalisador é uma substância capaz de aumentar a velocidade de uma reação química, diminuindo a energia de ativação necessária para que ela ocorra (Figura 7). As enzimas funcionam como catalisadores biológicos, ou seja, desempenham o mesmo papel de um catalisador químico, mas com maior especificidade (Lewis; Stone, 2023).

Figura 7 Comparação da energia de ativação sem enzimas e com enzimas



Fonte: Figura adaptada de WESTERN OREGON UNIVERSITY.

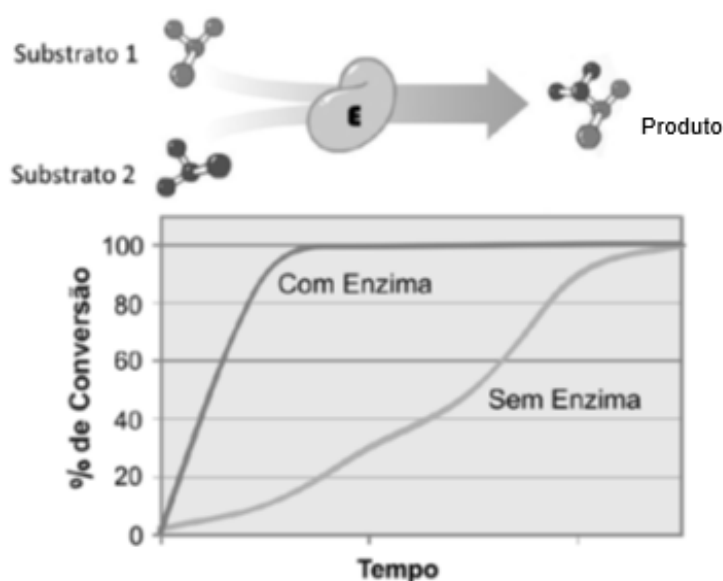
Identificadas pelo sufixo “-ase” (como amilase, celulase, catalase e lipase), as enzimas apresentam alta especificidade por determinados substratos, que se dá por meio do sítio ativo, região da proteína onde ocorre o reconhecimento molecular. Elas operam segundo o modelo encaixe induzido, formando um complexo temporário que facilita a transformação química e liberando o produto, mantendo a enzima disponível para novos ciclos catalíticos (Infoescola, 2025).

Embora a maioria das enzimas seja proteica, existem também enzimas de RNA, chamadas ribozimas, como a Ribonuclease P e a Hammerhead ribozyme, que catalisam reações químicas (De La Peña et al., 2017).

Um exemplo notável do poder catalítico das enzimas é a Orotidina 5'-fosfato descarboxilase (ODCase), cuja reação espontânea levaria cerca de 78 milhões de anos, mas com a enzima ocorre em apenas 25 milissegundos (Wolfenden; Snider, 2001).

Conforme demonstrado na Figura 8, a presença da enzima acelera significativamente a reação, evidenciando seu poder catalítico.

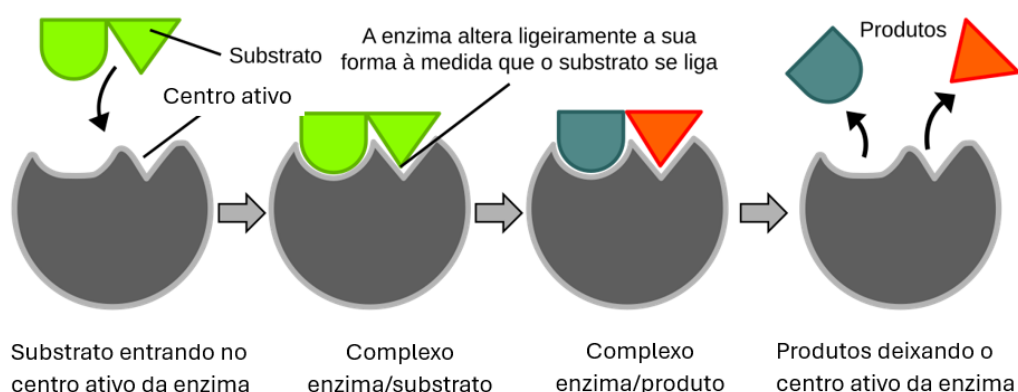
Figura 8 Esquema gráfico da conversão de substrato em produto.



Fonte: Monteiro e Silva (2009)

Historicamente, a interação entre enzima e substrato era explicada pelo modelo “chave-fechadura”, no qual o sítio ativo possui uma forma rígida complementar ao substrato. Atualmente, o modelo mais aceito é o de ajuste induzido, em que a ligação do substrato provoca pequenas alterações conformacionais na enzima, otimizando a catálise conforme demonstrado na Figura 9, que demonstra mecanismo de ação enzimática. O sítio ativo, junto com o restante da molécula, cria um microambiente que orienta corretamente o substrato e garante estabilidade à reação, favorecendo sua eficiência (Infoescola, 2025).

Figura 9 Mecanismo de ação enzimática



Fonte: Figura adaptada de Mundo da Educação

Como catalisadores biológicos, as enzimas não são consumidas durante a reação, podendo participar de múltiplos ciclos catalíticos. Sua atividade depende de fatores físico-químicos, como temperaturas muito altas, pH fora da faixa ótima e concentrações relativas de enzima e substrato. Essas condições podem desnaturar a proteína ou alterar a conformação do sítio ativo, reduzindo sua eficiência (Monteiro e Silva (2009).

No organismo humano, as enzimas são produzidas tanto intracelularmente, regulando vias metabólicas, quanto extracelularmente, como no suco gástrico e em outros fluidos corporais.

Na indústria, as enzimas são geralmente produzidas por microrganismos, como fungos e bactérias, muitas vezes geneticamente modificados para otimizar o rendimento. Dependendo de sua composição, uma enzima pode se apresentar como

apoenzima (parte proteica), coenzima (componente não proteico) ou holoenzima (associação das duas partes).

Em comparação com catalisadores químicos convencionais, as enzimas apresentam vantagens como biodegradabilidade, atuação em condições brandas de pH e temperatura e alta especificidade, evitando a formação de subprodutos indesejados. Por essas razões, são amplamente aplicadas na indústria de alimentos, bebidas, detergentes, cosméticos, papel e celulose, farmacêutica e biocombustíveis. Além de aumentar a eficiência produtiva, contribuem para a sustentabilidade, reduzindo resíduos e impactos ambientais (Monteiro e Silva 2009).

Do ponto de vista bioquímico, as reações catalisadas por enzimas podem ser exergônicas (quando liberam energia) ou endergônicas (quando consomem energia). Em ambos os casos, a enzima atua dando o “pontapé inicial” para que o processo ocorra de forma rápida e controlada, sem alterar a energia livre final da reação, apenas reduzindo a energia de ativação necessária (Zille, 2014).

Apesar dos avanços, ainda existem desafios relacionados à descoberta de novas enzimas, ao aprimoramento de suas propriedades e à produção em larga escala. No entanto, a redução dos custos produtivos, aliada às vantagens ambientais e tecnológicas — como o uso de DNA recombinante para otimizar a produção e a aplicação de extremozimas resistentes a condições extremas — tem consolidado o papel das enzimas como ferramentas indispensáveis na biotecnologia e na indústria moderna.

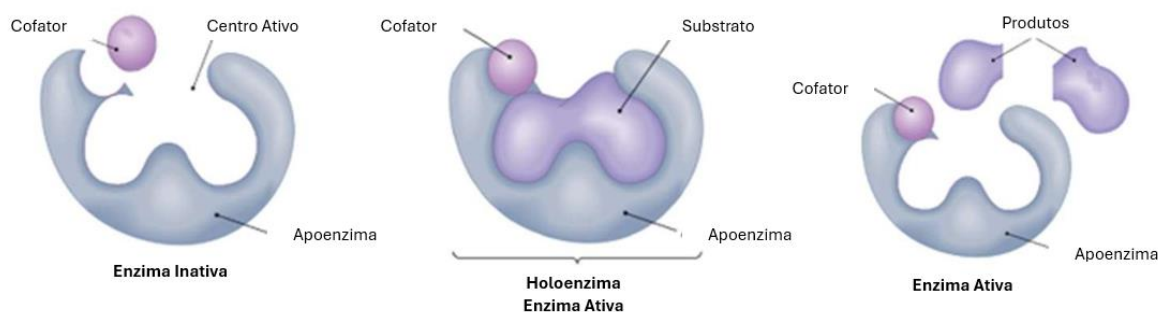
6.2.1 Modelos de interação enzima- substrato

A especificidade enzimática sempre foi um ponto central no estudo da enzimologia. Inicialmente, para explicar como enzimas reconhecem e se ligam a seus substratos, foi proposto o modelo chave-fechadura. Nesse modelo, a enzima seria a “fechadura” e o substrato a “chave”, de forma que apenas um substrato específico se encaixaria no sítio ativo da enzima. Entretanto, esse modelo mostrou-se limitado, pois considerava as enzimas como estruturas rígidas. Com o avanço das técnicas de cristalografia de proteínas e espectroscopia, verificou-se que as enzimas possuem

uma estrutura dinâmica e flexível. Em 1958, o bioquímico Daniel Koshland propôs o modelo do encaixe induzido, segundo o qual o sítio ativo sofre alterações conformacionais ao se aproximar do substrato, promovendo maior eficiência catalítica (Mundo Educação, 2025).

Esse processo é ilustrado na Figura 10, que apresenta o funcionamento das enzimas com cofatores, destacando a interação entre estrutura e atividade catalítica. A analogia mais utilizada é a de uma mão que se ajusta a uma luva ou um aperto de mão.

Figura 10 Esquema de funcionamento de enzimas com cofatores.



Fonte: Zille (2014)

Dessa forma, a especificidade enzimática não decorre apenas de uma complementaridade rígida, mas de um processo dinâmico de ajuste, que torna a ligação enzima-substrato mais eficiente.

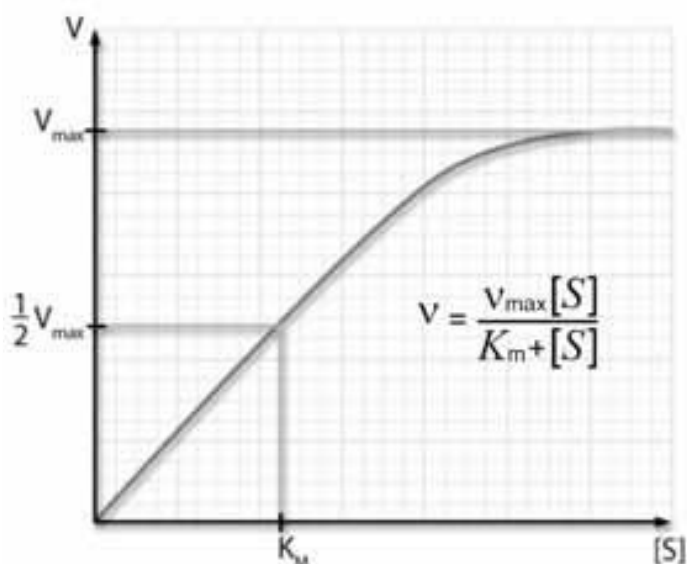
6.2.2 Cinética enzimática

O estudo da cinética enzimática começou no início do século XX, quando Victor Henri propôs uma teoria para explicar como a velocidade das reações enzimáticas poderia ser medida. Mais tarde, em 1913, Michaelis e Menten desenvolveram uma equação que se tornou referência na área. Essa fórmula permite calcular a velocidade máxima da reação (V_{max}) e a constante de Michaelis (K_m), que indica a concentração de substrato necessária para atingir metade da V_{max} . Esses conceitos são

fundamentais para entender como enzimas funcionam em diferentes condições e são amplamente utilizados na indústria(Monteiro e Silva, 2009).

Quando a quantidade de substrato é baixa, a velocidade da reação aumenta conforme mais substrato se liga à enzima. Porém, esse aumento tem um limite: quando todos os sítios ativos estão ocupados, a reação atinge sua velocidade máxima. Esse comportamento é representado pela curva de saturação (Figura 11), que mostra como a velocidade varia com a concentração de substrato. Segundo Monteiro e Silva (2009), esse tipo de análise é essencial para ajustar processos industriais que dependem da ação enzimática.

Figura 11 Curva de saturação numa reação enzimática



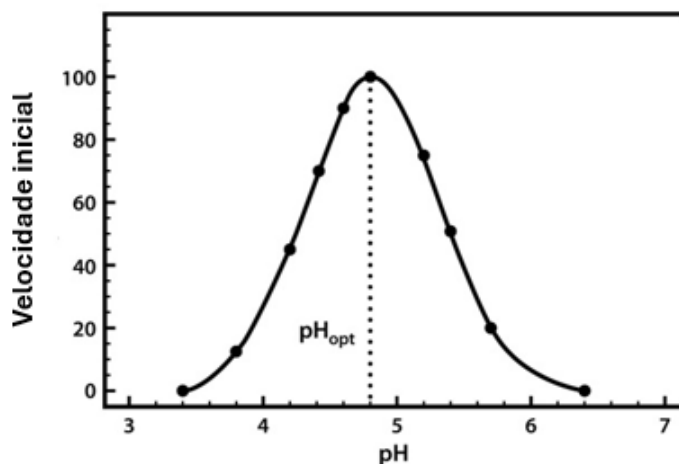
Fonte: Monteiro e Silva (2009)

Além disso, as enzimas podem ser afetadas por substâncias chamadas inibidores, que diminuem ou bloqueiam sua atividade. Existem diferentes tipos de inibição: a competitiva, em que o inibidor compete com o substrato pelo sítio ativo; a acompetitiva, que ocorre quando o inibidor se liga ao complexo enzima-substrato; e a mista, que combina os dois mecanismos. Esses modelos de inibição são descritos com detalhes na literatura especializada, como no estudo de Monteiro e Silva (2009), e são muito úteis em áreas como farmacologia e biotecnologia.

6.2.3 Influência do pH

Conforme Monteiro e Silva (2009), a atividade das enzimas depende diretamente das condições do meio em que atuam, sendo o pH um dos fatores mais importantes. Cada enzima possui um intervalo específico de pH no qual sua ação é mais eficiente, conhecido como pH ótimo (Figura 12).

Figura 12 Representação da influencia do pH na atividade enzimática



Fonte: Figura adaptada de Western Oregon University

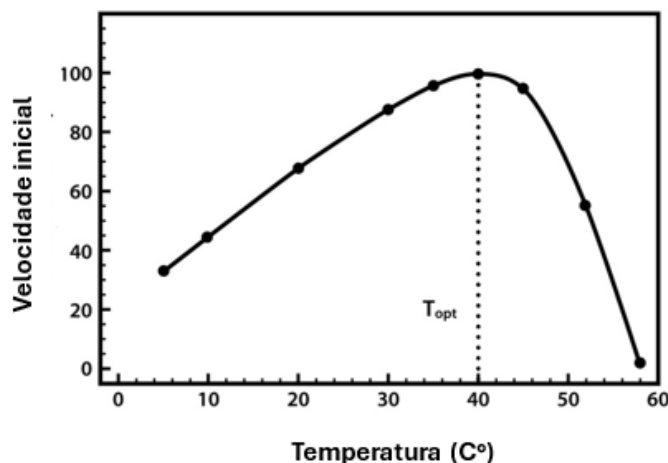
Quando o pH se afasta dessa faixa ideal, ocorre alteração na ionização dos grupos químicos presentes nos aminoácidos da enzima, o que pode modificar sua estrutura tridimensional. Essas mudanças afetam o encaixe entre enzima e substrato, reduzindo ou até anulando sua capacidade catalítica (Monteiro; Silva, 2009).

6.2.4 Influência da Temperatura

Segundo Monteiro e Silva (2009), a temperatura é outro fator crítico. Em geral, o aumento da temperatura promove maior agitação molecular, acelerando as reações químicas. Contudo, esse efeito tem um limite: temperaturas elevadas podem causar desnaturação irreversível da enzima, destruindo sua conformação nativa. O gráfico que relaciona atividade enzimática e temperatura apresenta um perfil característico,

com crescimento progressivo até o ponto ótimo, seguido por uma queda abrupta da atividade (Figura 13).

Figura 13 Gráfico demonstrando a influência da temperatura e a atividade enzimática



Fonte: Figura adaptada de Western Oregon University

6.2.5 Influência da concentração dos substratos

As concentrações de enzima e substrato também são determinantes no controle da velocidade da reação, comportamento que é descrito de forma clássica pelo modelo de Michaelis-Menten. Enquanto a concentração de enzima determina a capacidade máxima de catalisar reações, a disponibilidade de substrato regula em que medida essa capacidade será explorada, até o limite imposto pela saturação enzimática (Monteiro e Silva, 2009).

6.2.6 Influência do tempo

O tempo de reação é um fator determinante na eficiência dos processos enzimáticos aplicados ao beneficiamento têxtil. Períodos curtos podem não permitir que a enzima atue de forma completa sobre o substrato, enquanto tempos excessivos favorecem reações indesejadas, como a degradação parcial das fibras e a perda de resistência do tecido.

A estabilidade das enzimas em função da temperatura e do pH está diretamente relacionada à duração do contato com o substrato, tornando essencial o controle preciso das condições de operação (Giordano, 2012).

Nos processos de estonagem enzimática com celulasas, o tempo influencia diretamente o resultado visual e o desgaste do denim. Estudos indicam que períodos entre 30 e 60 minutos são adequados para obter o efeito de desgaste característico sem comprometer a integridade das fibras. Tempos superiores podem causar perda de massa, enquanto períodos muito curtos resultam em acabamento incompleto (Cavaco-Paulo; Gübitz, 2003).

Ainda segundo Cavaco-Paulo; Gübitz, (2003), na desengomagem com amilases, o tempo também é determinante para garantir a remoção total das gomas aplicadas ao tecido. Em condições ideais de temperatura e pH, tempos próximos de 20 a 30 minutos são suficientes para assegurar uma desengomagem eficiente e uniforme. Já em tratamentos de efluentes com lacases, devido à complexidade dos corantes, são necessários tempos de reação mais longos, geralmente superiores a 90 minutos, para alcançar degradação significativa dos compostos coloridos.

De modo geral, o ajuste adequado do tempo de reação, aliado ao controle de temperatura e pH, é essencial para maximizar a atividade enzimática, reduzir o consumo de produtos químicos e minimizar o impacto ambiental. Processos otimizados podem diminuir o uso de energia e insumos, contribuindo para um beneficiamento têxtil mais eficiente e sustentável (Cavaco-Paulo; Gübitz, 2003).

6.2.7 Influência de cofatores, coenzimas e inibidores

Algumas enzimas dependem da presença de cofatores e coenzimas para desempenhar sua função adequadamente. Esses componentes podem ser íons metálicos ou moléculas orgânicas, que atuam como auxiliares indispensáveis no processo catalítico (Zille, 2014).

Por fim, é importante destacar o papel dos inibidores enzimáticos, substâncias capazes de reduzir ou até mesmo bloquear a atividade de uma enzima. Eles podem atuar de diferentes formas: competindo diretamente com o substrato pelo sítio ativo

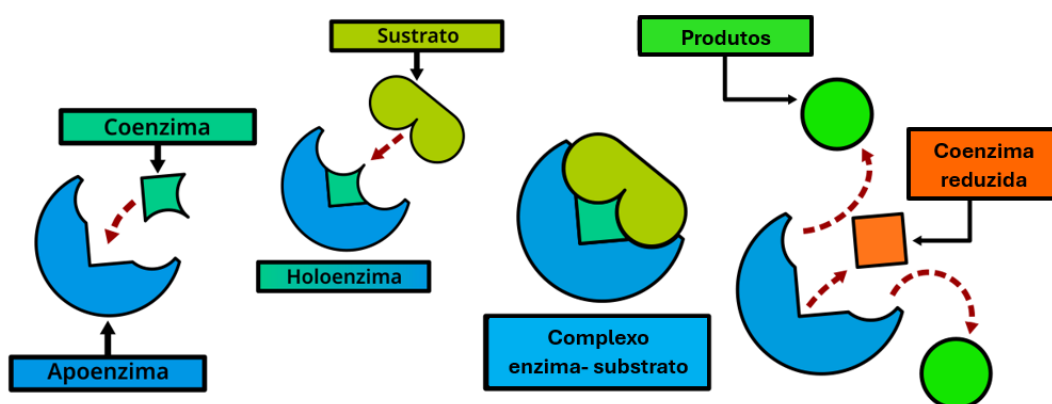
(inibidores competitivos), interagindo em regiões distintas da enzima (não competitivos), combinando mecanismos (mistos) ou promovendo inibição irreversível. Muitos fármacos exploram esse princípio para modular vias metabólicas específicas, ao passo que diversas toxinas utilizam esse mesmo mecanismo para prejudicar processos vitais.

6.2.8 Cofatores, Coenzimas e Isoenzimas

As enzimas são proteínas catalíticas essenciais para a realização de reações bioquímicas em organismos vivos, acelerando processos que, de outra forma, seriam extremamente lentos. No entanto, nem todas as enzimas atuam de forma independente; muitas necessitam de moléculas auxiliares, conhecidas como cofatores ou coenzimas, para desempenhar suas funções catalíticas de maneira eficaz. Esses componentes, associados às apoenzimas, formam as holoenzimas ativas, garantindo que o metabolismo celular ocorra de maneira eficiente e regulada. Os cofatores podem ser de origem inorgânica ou orgânica, e sua presença é fundamental para a atividade enzimática (Lewis; Stone, 2023).

Apoenzima é a fração proteica da enzima que, isoladamente, é inativa. Quando se associa a um cofator ou a uma coenzima, constitui a holoenzima, a forma ativa da enzima capaz de catalisar reações químicas (Figura 14).

Figura 14 Modelo de ligação enzima coenzima e substrato.



Fonte: Figura adaptada Wikimedia Commons.

Os cofatores podem ser de origem inorgânica — como íons metálicos — ou orgânica — como compostos derivados de vitaminas — e são essenciais para a atividade enzimática, já que ativam ou estabilizam a enzima (Lewis; Stone, 2023).

Alguns cofatores ou coenzimas se ligam permanentemente à enzima, funcionando como grupos prostéticos, enquanto outros se associam de forma reversível. A presença desses auxiliares permite que as enzimas realizem corretamente suas funções metabólicas, como ocorre com vitaminas e sais minerais obtidos na dieta humana. Sem eles, muitas reações bioquímicas seriam lentas ou inviáveis. (Robinson, 2015).

As isoenzimas são diferentes formas de uma mesma enzima que realizam a mesma reação química, mas apresentam pequenas diferenças em sua estrutura e na forma como são controladas pelo organismo. Essas variações permitem que cada tecido ou condição fisiológica utilize a forma de enzima mais adequada, tornando o metabolismo mais eficiente e ajustado às necessidades do corpo (Nelson; Cox, 2022, Cap. 6, P. 213–214).

Além das enzimas formadas por proteínas, existem também as ribozimas, que são moléculas de RNA capazes de catalisar reações químicas. Elas atuam de maneira semelhante às enzimas tradicionais, mostrando que o RNA também pode participar de processos biológicos importantes. As ribozimas ajudam a explicar como algumas reações essenciais poderiam ter ocorrido nas primeiras etapas da evolução da vida (Nelson; Cox, 2022, Cap. 8, P. 269).

Nos contextos industrial e biotecnológico, a presença adequada de cofatores e coenzimas é essencial para garantir a máxima eficiência enzimática. Esses componentes possibilitam a realização de processos como a produção de alimentos, fármacos e compostos químicos de forma mais rápida, sustentável e econômica. A compreensão da função e da estabilidade desses auxiliares permite otimizar as condições de reação e reduzir custos de operação, favorecendo o uso de enzimas em larga escala (Robinson, 2015).

6.2.9 Vantagens e limitações no uso de enzimas

O uso de enzimas em processos industriais apresenta inúmeras vantagens que contribuem para a sustentabilidade e eficiência produtiva.

Segundo Monteiro e Silva (2009), algumas dessas vantagens são:

- Alta especificidade: catalisam reações químicas específicas, reduzindo a formação de subprodutos indesejados e aumentando a eficiência dos processos.
- Condições brandas de operação: atuam em temperaturas e valores de pH próximos aos fisiológicos, diminuindo o consumo de energia e evitando a degradação dos produtos.
- Biodegradabilidade: por serem substâncias biológicas, são biodegradáveis e geram menor impacto ambiental do que catalisadores químicos sintéticos.
- Melhoria na qualidade dos produtos: possibilitam maior controle das reações, resultando em produtos com características específicas e de maior valor agregado.
- Eficiência energética: operam em condições mais suaves, reduzindo a necessidade de aquecimento e pressão.
- Redução de efluentes tóxicos: diminuem o uso de reagentes agressivos, facilitando o tratamento de resíduos e contribuindo para processos mais sustentáveis.

Apesar dessas vantagens, os autores também destacam alguns desafios que precisam ser superados para ampliar o uso de enzimas em escala industrial (Monteiro; Silva, 2009):

- Sensibilidade a condições ambientais: variações de temperatura, pH ou presença de solventes podem comprometer a atividade e a estabilidade enzimática.
- Custo de produção e purificação: a obtenção e o refino das enzimas ainda representam custos elevados, embora haja estudos voltados à sua redução.

- Necessidade de adaptação industrial: a introdução de processos enzimáticos pode exigir ajustes nas linhas de produção e investimentos em novas tecnologias.
- Escalabilidade: a ampliação dos processos laboratoriais para o nível industrial requer manutenção da eficiência e estabilidade das enzimas em grande escala.

6.3 Classificação das enzimas

As enzimas são proteínas que aceleram reações químicas nos organismos vivos, tornando-as mais rápidas e eficientes. Elas agem com alta especificidade, ou seja, cada enzima atua sobre um tipo de substância ou reação específica.

Para padronizar seus nomes e funções, a União Internacional de Bioquímica criou, em 1956, a Comissão Internacional de Enzimas (EC – Enzyme Commission), que organizou as enzimas em seis classes principais, de acordo com o tipo de reação que realizam (Nelson; Cox, 2022):

- Oxidorredutases: catalisam reações de oxidação-redução, transferindo elétrons entre moléculas.
- Transferases: transferem grupos funcionais (como fosfato ou amina) de uma molécula para outra.
- Hidrolases: promovem reações de hidrólise, quebrando ligações covalentes com participação de água.
- Liases: adicionam ou removem grupos formando ou rompendo ligações duplas, sem hidrólise.
- Isomerases: reorganizam os átomos dentro da molécula, formando isômeros.
- Ligases: unem duas moléculas, geralmente usando energia proveniente da hidrólise de ATP.

Podemos ver o tipo de reação segundo a classe das enzimas na Figura 15.

Figura 15 Classificação das enzimas segundo Comissão Internacional de Enzimas

Classe enzimática	Tipo reação
1. OXIDORREDUTASES	$A-H_2 + B \rightarrow BH_2 + A$
2. TRANSFERASES	$A-B + C \rightarrow A-C + B$
3. HIDROLASES	$AB + H_2O \rightarrow AOH + BH$
4. LIASES	$A-B \rightarrow A + B$
5. ISOMERASES	$A-B \rightarrow B-A$
6. LIGASES	$A-b + C \rightarrow A-C + b$

Fonte: Zille (2014)

Cada enzima recebe um número EC de quatro dígitos, que indica:

- Primeiro dígito: classe da enzima
- Segundo dígito: subclasse ou tipo de grupo químico envolvido
- Terceiro dígito: especificidade do aceptor ou doador na reação
- Quarto dígito: número sequencial da enzima dentro da subclasse

Cada enzima recebe um número EC (Enzyme Commission) formado por quatro partes, que indicam a classe, o tipo de reação e a posição da enzima na lista oficial. Por exemplo, na enzima lactato desidrogenase (EC 1.1.1.27), o primeiro número (1) mostra que ela pertence à classe das oxidorredutases, e o último número (27) indica que é a 27ª enzima registrada nessa categoria (Nelson; Cox, 2022).

Os nomes das enzimas geralmente terminam com o sufixo “-ase”, relacionado ao seu substrato ou função, como amilase e lipase. Algumas mantêm nomes tradicionais, como tripsina e papaína (Nelson; Cox, 2022).

6.4 Inibidores enzimático

Segundo Monteiro e Silva (2009), as enzimas podem ter sua atividade reduzida ou bloqueada por substâncias chamadas inibidores enzimáticos, que interferem na ligação entre a enzima e o substrato. Esses inibidores podem atuar de diferentes

formas, dependendo do tipo de interação com o sítio ativo da enzima ou com o complexo enzima–substrato.

Entre os principais tipos de inibição estão:

- Inibição competitiva: o inibidor apresenta estrutura semelhante à do substrato e compete pelo mesmo sítio ativo. Nesse caso, a reação pode ser restabelecida com o aumento da concentração do substrato. (Figura 16).

Figura 16 Esquema de inibição competitiva enzimática



Fonte: Figura Adaptada de Lecturio. Enzyme Inhibition.

- Inibição não competitiva: o inibidor não se liga à enzima livre, mas ao complexo enzima-substrato (Figura 17). Isso leva à inativação do complexo, impedindo a formação do produto e reduzindo a eficiência catalítica.

Figura 17 - Esquema de inibição não competitiva enzimática



Fonte: Figura adaptada de Lecturio. Enzyme Inhibition.

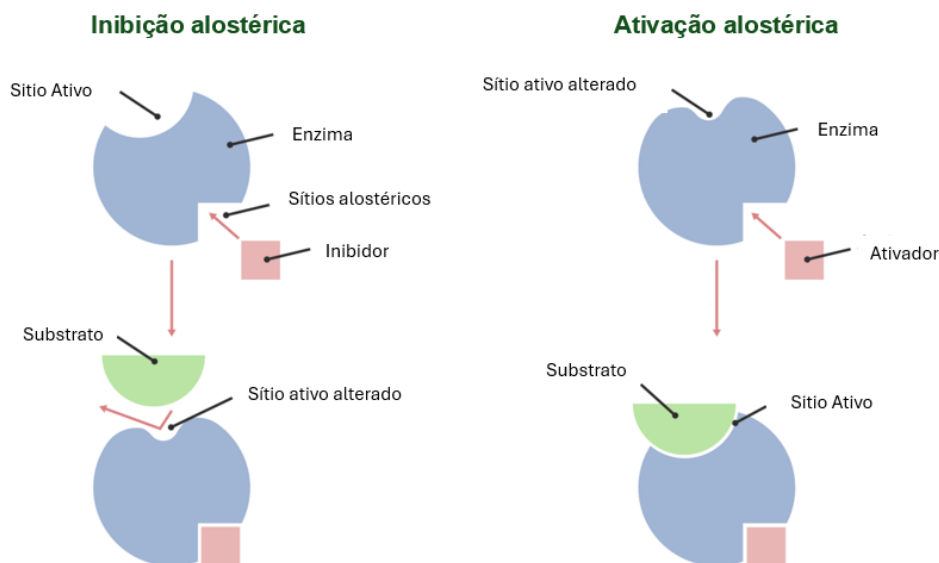
- Inibição mista: neste caso, o inibidor pode se ligar tanto à enzima livre quanto ao complexo enzima-substrato, mas em sítios distintos do ativo. Esse tipo de inibição provoca alterações conformacionais na enzima, reduzindo a atividade catalítica.

Além dos inibidores competitivos, não competitivos e mistos, existem modalidades que afetam a enzima de maneira mais duradoura ou indireta.

A inibição irreversível ocorre quando o inibidor estabelece ligações covalentes com a enzima ou com grupos funcionais essenciais do seu centro ativo, resultando na perda permanente da atividade catalítica. Esse tipo de inibição é exemplificado por certas toxinas e venenos de insetos, que desnaturam completamente a enzima, ou pelo cianeto, que interfere em enzimas respiratórias. Alguns compostos farmacológicos podem atuar como inibidores irreversíveis temporários, como a cafeína sobre a adenilato ciclase, modulando a atividade enzimática por períodos limitados (Nelson; Cox, 2022, Cap. 6, P. 227–228).

Além disso, existem inibidores que se ligam a regiões distintas do sítio ativo, conhecidas como sítios alostéricos, provocando alterações conformacionais temporárias na enzima. Essas mudanças reduzem a atividade catalítica sem impedir a ligação do substrato, permitindo um controle mais flexível e reversível da função enzimática (Figura 18). Esse tipo de regulação é essencial em processos metabólicos e também é explorado em sistemas industriais que requerem ajustes finos na atividade enzimática (Nelson; Cox, 2022, Cap. 6, p. 227–228).

Figura 18 Representação comparativa entre inibição e ativação alostérica



Fonte: Figura Adaptada Dhande, Sagar.

Dessa forma, os diferentes tipos de inibição enzimática (competitiva, não competitiva, mista, irreversível e alostérica), demonstram a diversidade de estratégias que podem modular a atividade das enzimas. Enquanto os inibidores competitivos e mistos atuam diretamente no sítio ativo ou no complexo enzima-substrato, os irreversíveis e alostéricos influenciam a função de maneira permanente ou conformacional, oferecendo ferramentas valiosas tanto para o estudo bioquímico quanto para aplicações farmacológicas e biotecnológicas.

6.5 Processo produtivo das enzimas

Segundo Monteiro e Silva (2009), as enzimas podem ser obtidas a partir de diferentes fontes, como células animais, vegetais ou microbianas. No entanto, a produção em larga escala é feita principalmente por microrganismos, devido à sua facilidade de cultivo, baixo custo e alta produtividade.

A produção industrial ocorre por meio de processos fermentativos, que podem ser realizados em meio submerso, utilizando biorreatores com meio líquido, ou em

meio sólido, com substratos agrícolas de baixa umidade. Cada método apresenta vantagens e limitações: a fermentação em estado sólido é mais econômica e apresenta menor risco de contaminação, enquanto a fermentação submersa oferece maior controle dos parâmetros de processo e permite reações mais rápidas (Monteiro e Silva 2009).

Ainda segundo Monteiro e Silva (2009), o processo produtivo pode ser dividido em duas etapas principais. A primeira, denominada upstream, envolve o preparo do meio, a esterilização, a inoculação e o controle de variáveis como pH, temperatura e aeração. A segunda, chamada downstream, compreende a recuperação, purificação e formulação da enzima, empregando técnicas como filtração, centrifugação, cromatografia e secagem, a fim de garantir um produto final estável e ativo.

Além disso, a aplicação de técnicas biotecnológicas e de engenharia genética tem permitido o desenvolvimento de microrganismos com maior capacidade produtiva e enzimas mais estáveis, o que contribui para a eficiência e a redução de custos na produção industrial.

Outra estratégia importante é a imobilização enzimática, que consiste em fixar as enzimas em suportes sólidos, como materiais porosos ou carvão ativado. Essa técnica aumenta a estabilidade e a reutilização das enzimas, reduzindo a degradação e tornando o processo mais econômico e sustentável. O armazenamento adequado também é essencial para preservar a atividade enzimática, devendo-se manter temperaturas controladas e proteção contra a luz (Monteiro e Silva 2009).

A produção industrial de enzimas envolve etapas críticas como fermentação, separação e purificação, sendo esta última essencial para garantir a atividade e estabilidade do biocatalisador. O processo de purificação pode incluir técnicas como filtração, centrifugação, precipitação, cromatografia e liofilização, dependendo da natureza da enzima e do microrganismo produtor. A escolha adequada dessas etapas permite a obtenção de enzimas com alto grau de pureza e eficiência catalítica, fundamentais para aplicações industriais específicas (Monteiro; Silva, 2009).

6.6 Mercado e aplicações industriais das enzimas

As enzimas são catalisadores biológicos utilizados pelo homem há milênios na produção de alimentos como pães e vinhos e, atualmente, possuem aplicação em diversos setores industriais, incluindo alimentício, farmacêutico, cosmético, papel e celulose, saneantes e têxtil (Monteiro; Silva, 2009).

Segundo a Associação Brasileira de Embalagem (ABRE, 2025), “O mercado global de enzimas industriais está avaliado em US\$ 7,9 bilhões em 2024 e deve atingir US\$ 17,77 bilhões até 2035”, com crescimento anual médio de 7,65%. Esse avanço é impulsionado pela demanda por soluções mais sustentáveis, eficiência energética e substituição de produtos químicos convencionais. Setores como alimentos e bebidas, biocombustíveis, têxteis, produtos de limpeza e farmacêuticos estão entre os que mais se beneficiam do uso de enzimas industriais. Além disso, investimentos em engenharia enzimática e biocatalisadores avançados reforçam o papel estratégico desse mercado na bioeconomia global.

No Brasil, o Decreto nº 6.041/2007 estabelece a Política Nacional de Desenvolvimento da Biotecnologia, com o objetivo de estimular a inovação, a eficiência produtiva e a competitividade da bioindústria (BRASIL, 2007). O decreto destaca a produção de enzimas industriais como área estratégica, incentivando processos fermentativos e extrativos a partir de matérias-primas renováveis e cria o Comitê Nacional de Biotecnologia para coordenar ações voltadas ao desenvolvimento e à aplicação da biotecnologia no país. Dessa forma, o cenário nacional se alinha às tendências globais, promovendo o crescimento e a sustentabilidade do setor enzimático.

6.6.1 Indústria alimentícia

Segundo Monteiro e Silva (2009), o uso de enzimas na produção de alimentos é uma das aplicações mais antigas da biotecnologia. Desde as civilizações egípcia e babilônica, processos fermentativos já eram utilizados na fabricação de vinho, cerveja e pão, evidenciando a ação enzimática na transformação de alimentos.

O uso moderno começou em 1874, quando Christian Hansen extraiu renina do estômago de bezerros para a produção de queijos. Atualmente, enzimas microbianas

como amilases, proteases e pectinases são amplamente utilizadas na panificação, laticínios, produção de sucos, vinhos e cervejas, otimizando o sabor, a textura e o rendimento dos produtos (Cavaco-Paulo; Gübitz, 2003).

6.6.2 Indústria farmacêutica e de cosmético

Monteiro e Silva (2009) destacam que as enzimas também têm papel importante na indústria farmacêutica e cosmética, sendo utilizadas na formulação de medicamentos, diagnósticos clínicos e produtos dermatológicos. Na área cosmética, o uso enzimático — conhecido como “enzimocosmética” — vem crescendo, principalmente em esfoliantes e produtos antienvelhecimento, devido à capacidade das enzimas de promover reações específicas sob condições suaves e seguras (Cavaco-Paulo; Gübitz, 2003).

6.6.3 Indústria Papel e Celulose

De acordo com Monteiro e Silva (2009), o uso de enzimas na indústria de papel começou com as amilases, que modificam o amido e melhoram a resistência do papel.

A partir da década de 1980, xilanases e lacases passaram a ser amplamente aplicadas no branqueamento da polpa, reduzindo o consumo de produtos químicos como o cloro e diminuindo o impacto ambiental.

Segundo Cavaco-Paulo e Gübitz (2003), enzimas como peroxidases e lipases também contribuem para o tratamento de efluentes e remoção de impurezas, melhorando a qualidade final do produto e tornando o processo mais sustentável.

6.6.4 Indústria de saneantes

Monteiro e Silva (2009) apontam que as enzimas são amplamente empregadas na formulação de detergentes e produtos de limpeza. Elas degradam resíduos orgânicos — como proteínas, gorduras e amidos — permitindo uma limpeza eficiente mesmo em baixas temperaturas e pH neutro.

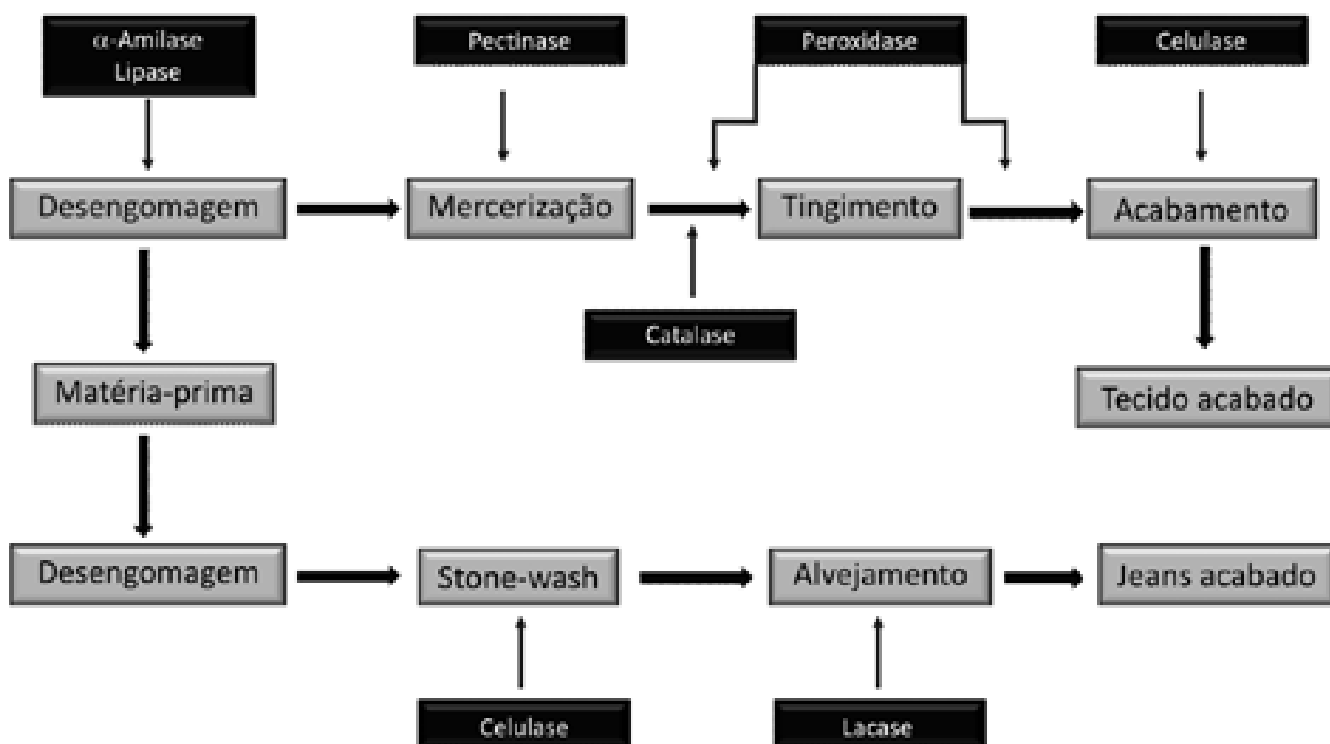
Conforme Cavaco-Paulo e Gübitz (2003), os detergentes enzimáticos têm ganhado destaque por serem biodegradáveis e reduzirem o uso de compostos

químicos agressivos, tornando-se uma alternativa mais sustentável para o setor doméstico, hospitalar e industrial.

6.6.5 Indústria têxtil

Segundo Monteiro e Silva (2009), as enzimas têm sido amplamente aplicadas na indústria têxtil, desempenhando papéis importantes em diversas etapas do processamento, como desengomagem, biopolimento, estonagem, branqueamento, tingimento e tratamento de efluentes. O uso dessas biomoléculas tem permitido substituir processos químicos agressivos por alternativas mais seletivas e ambientalmente sustentáveis. (Figura 19) .

Figura 19 Fluxograma de aplicações das enzimas na industria textl



Fonte: Monteiro e Silva (2009).

Amilases removem gomas de amido de forma seletiva, sem danificar as fibras; celulasas promovem biopolimento de algodão e estonagem de tecidos denim, reduzindo pilling e conferindo aspecto lavado sem necessidade de abrasivos;

proteases e lipases auxiliam na remoção de resíduos protéicos ou lipídicos e no melhoramento do tingimento; e lacases e peroxidases contribuem para branqueamento e degradação de corantes, reduzindo o uso de peróxido de hidrogênio e agentes clorados. (Monteiro; Silva, 2009).

Ainda segundo Monteiro e Silva (2009), além de aumentar a eficiência dos processos, o uso de enzimas permite transformar substratos complexos em formas solúveis sob condições brandas, minimizando o impacto ambiental e a utilização de produtos químicos agressivos.

Pesquisas recentes demonstram que enzimas como lacases e peroxidases podem degradar corantes azo e antraquinona em efluentes, enquanto partículas magnéticas conjugadas com lacase ou enzimas ligninolíticas produzidas por fungos do gênero *Phanerochaete* podem reduzir a carga poluente e a dependência de peróxidos nos processos de alvejamento. Cavaco-Paulo; Gübitz, 2003).

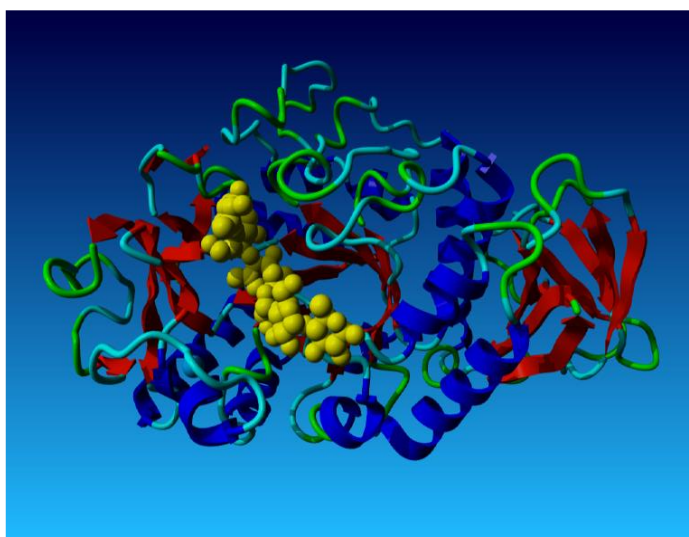
Dessa forma, as enzimas tornam-se uma solução sustentável, eficiente e inovadora, agregando valor ao produto final ao melhorar suas características estéticas e funcionais.

7 PRINCIPAIS ENZIMAS UTILIZADAS NO BENEFICIAMENTO TÊXTIL

7.1 Amilase

As amilases (Figura 20) atuam na desengomagem de tecidos de algodão, removendo o amido aplicado nos fios de urdume sem danificar as fibras. Por sua alta especificidade, possibilitam um processo mais limpo e eficiente, com menor consumo de energia e impacto ambiental. Segundo Cavaco-Paulo e Gübitz (2003), apresentam melhor desempenho em pH entre 5,5 e 6,25 e a temperaturas moderadas.

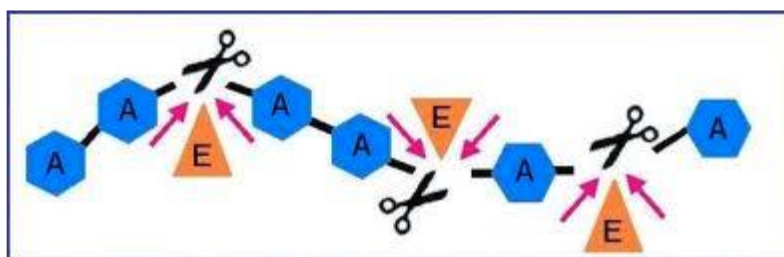
Figura 20 – Representação enzima Alfa amilase



Fonte: Zille (2014)

Segundo Zille (2014), as alfa-amilases promovem a hidrólise interna do amido de forma aleatória, gerando dextrinas solúveis que vão se tornando progressivamente menores (Figura 21).

Figura 21 - Esquema de hidrólise de dextrina



Fonte: Zille (2014)

A alfa-amilase de origem fúngica apresenta atividade multi-enzimática, conseguindo também degradar moléculas de lipídios e proteínas (Zille, 2014).

Podemos observar as propriedades das enzimas alfa-amilases na Tabela 01:

Tabela 01 Características das enzimas alfa-amilases

Alfamylases	
Origens	fungos filamentosos e bactérias.
pH ótimo	Entre 5,5 e 6,25
Temperatura ótima	50 até 70

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

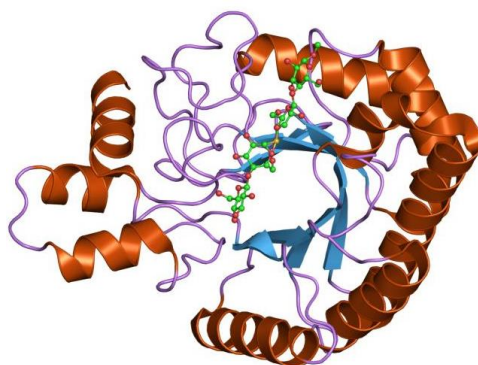
Existem alfa-amilases de alta temperatura, que podem ser aplicadas em temperaturas acima de 95°C e até mesmo em processos pad-steam (Zille, 2014).

Segundo Alaminos (2021), o método mais utilizado para avaliar a atividade da alfa-amilase em aplicações têxteis, especialmente nos processos de desengomagem enzimática, baseia-se no uso da escala TEGEWA em conjunto com uma solução de iodo e iodeto de potássio.

7.2 Celulase

Segundo Zille (2014), as celulasas são enzimas hidrolíticas que catalisam a quebra da celulose em oligossacarídeos e, eventualmente, glicose (Figura 22).

Figura 22 Representação enzima Celulase



Fonte: Maestro Virtuale.

Ainda segundo Zille (2014), elas constituem um sistema sinérgico composto por diferentes tipos de enzimas:

- Endoglucanases: cortam ligações internas da celulose, gerando fragmentos de menor peso molecular.
- Exocelulases: removem unidades de celobiose das extremidades das cadeias de celulose.
- Celobiasas: hidrolisam a celobiose em glicose

Podemos observar as propriedades das enzimas celulasas na Tabela 02:

Tabela 02 Características das enzimas Celulasas

Celulasas	
Origens	Fungos e bactérias
pH ótimo	Ácidas (pH 4,5–5,5) Neutras (pH 6,6–7) Alcalinas (pH 9–10)
Temperatura ótima	30 a 60 °C

Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de Zille (2014).

A aplicação das celulasas no processamento têxtil começou no final de 1980, com o acabamento do denim (remoção do índigo). Atualmente, elas também são utilizadas para a mercerização; scouring, biopolimento, lavagens; biostoning e carbonização (Alaminos, 2021).

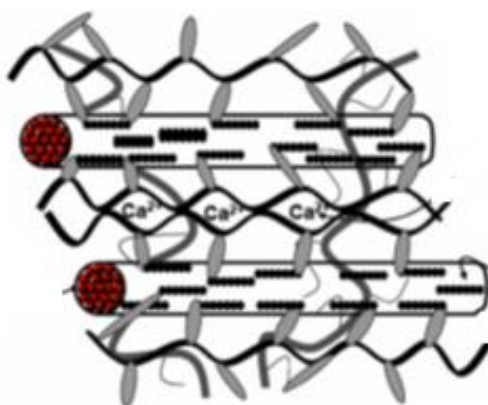
As celulasas atuam removendo microfibrilas salientes da superfície das fibras, restaurando maciez, brilho e uniformidade das cores. A ação mecânica intensa durante o tratamento influencia diretamente a eficiência enzimática, podendo aumentar a perda de massa do tecido e alterar a atividade relativa das enzimas endoglucanases (EG) e celobiohidrolases (CBH). Essas enzimas são produzidas por diversos microrganismos, incluindo fungos como *Aspergillus niger*, *Humicola insolens*, *Penicillium funiculosum* e *Trichoderma* spp., que geram enzimas extracelulares fáceis de produzir em larga escala (Cavaco-Paulo; Gübitz, 2003).

O biopolimento,, remove microfibrilas superficiais, conferindo ao algodão toque suave, superfície lisa, brilho e resistência a pilling. Além disso, essas enzimas podem substituir processos mecânicos tradicionais, como o stonewashed, reduzindo o desgaste dos tecidos e equipamentos. Para tecidos delicados ou tratamentos mais suaves, ajusta-se o pH e o tempo de ação para preservar as fibras, e a combinação com pectinases pode potencializar a remoção de impurezas sem comprometer a integridade do tecido (Cavaco-Paulo; Gübitz, 2003).

7.3 Pectinase

Segundo Zille (2024), o algodão cru apresenta diversas impurezas, incluindo ceras, pectinas, hemiceluloses e sais minerais presentes tanto na cutícula quanto na parede celular primária das fibras (Figura 23). Esses componentes conferem características hidrofóbicas ao algodão e podem prejudicar os processos de tingimento e acabamento.

Figura 23 - Representação enzima Pectinase



Fonte: Zille (2014)

As pectinases são enzimas responsáveis por degradar a pectina, um polissacarídeo presente na parede celular de tecidos vegetais. Segundo Alaminos (2021), essas enzimas podem ser classificadas em três tipos principais:

- Pectinases ácidas: atuam em pH entre 3,0 e 5,0, com temperatura ótima de 40 a 50 °C, sendo amplamente utilizadas em processos da indústria alimentícia.

- Pectinases neutras: apresentam atividade ideal em pH entre 6,0 e 7,5, com temperaturas de 40 a 55 °C, sendo frequentemente produzidas por bactérias.
- Pectinases alcalinas: operam em pH entre 8,0 e 10,0 e temperatura ótima de 50 a 60 °C, tornando-se adequadas para aplicações industriais que demandam condições mais severa

Podemos observar as propriedades das enzimas pectinases na Tabela 03:

Tabela 03 Características das enzimas Pectinases

Pectinases	
Origens	Fungos filamentosos e bactérias
pH ótimo	Pectinase acida: 3,0 – 5,0 Pectinase neutra: 6,0 – 7,5 Pectinase alcalina: 8,0 – 10,0
Temperatura ótima	Pectinase acida: 40 – 50 °C Pectinase neutra: 40 – 55 °C Pectinase alcalina: 50 – 60 °C

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

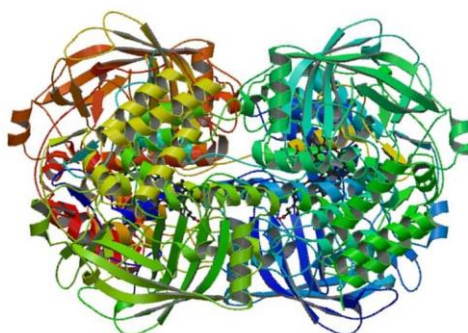
Podem ser usadas no processo de lavagem enzimática (bioscouring) porém, essa enzima ainda não é amplamente utilizada em escala industrial, principalmente devido à falta de estabilidade em altas temperaturas e em condições alcalinas (Zille, 2014).

7.4 Catalase

Na indústria têxtil, o alvejamento com peróxido de hidrogênio é normalmente feito após a desengomagem e antes do tingimento. Para remover o excesso de H_2O_2 , pode-se utilizar a enzima catalase (Figura 24), que decompõe o peróxido em água e oxigênio, evitando o uso de agentes redutores adicionais e diminuindo o consumo de água no enxágue Zille (2014).

Figura 24 - Representação enzima Catalase

Catalase



©Protein Data Bank Japan

Fonte: Zille (2014)

Podemos observar as propriedades das enzimas catalases na Tabela 04:

Tabela 04 Características das enzimas Catalases

Catalase	
Origens	Microbiana
pH ótimo	5 até 8
Temperatura ótima	20 até 50°C

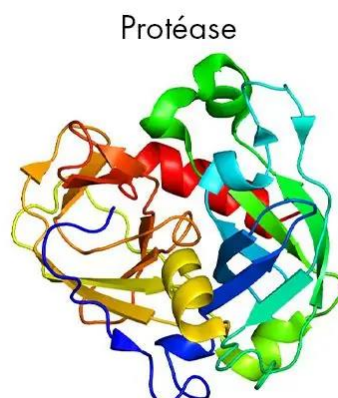
Fonte: Elaborado pelo autor, com dados de Zille (2014).

7.5 Protease

Existem diferentes tipos de proteases, cada uma com características específicas quanto à origem, faixa ideal de pH e temperatura, além das aplicações industriais. Essas enzimas atuam hidrolisando ligações peptídicas, mas diferenciam-se pelo tipo de substrato que degradam e pelas condições em que apresentam maior eficiência (Therascience, 2025).

Apesar da variedade existente, todas compartilham o mesmo princípio básico de ação catalítica. A Figura 25 apresenta uma representação esquemática de uma protease, ilustrando sua estrutura geral.

Figura 25 - Representação enzima Protéase



Fonte: Therascience.

A subtilisina, é uma serine protease, uma protease alcalina produzida por *Bacillus subtilis*, é bastante utilizada em detergentes e no beneficiamento têxtil no tratamento de lã.

A papaína, extraída do fruto do mamoeiro (*Carica papaya*), é uma cisteína-protease sendo aplicada em alimentos, farmacêutica e na remoção da sericina da seda Zille (2014).

Podemos observar as propriedades das enzimas proteases na Tabela 05:

Tabela 05 Características das enzimas Proteases

Protease		
Tipo	serine protease	cisteína-protease
Origens	Bacteriana	Vegetal
pH ótimo	8 até 10	5 até 8
Temperatura ótima	50 até 60	65 até 80°C

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

7.6 Lacase

Segundo Zille (2014), as lacases são enzimas extracelulares multicobre que utilizam o oxigênio molecular para oxidar fenóis e outros compostos aromáticos e não aromáticos por meio de um mecanismo de reação por radicalização.

Sua gama de substratos é ampla e na indústria têxtil, as lacases são aplicadas no branqueamento do denim, oferecendo uma alternativa ecológica aos métodos tradicionais.

Segundo Cavaco-Paulo e Gübitz (2003), as lacases são enzimas oxidativas amplamente produzidas por fungos, especialmente basidiomicetos, e possuem importância crescente no tratamento e modificação de substratos lignocelulósicos. Essas enzimas apresentam melhor desempenho em condições ácidas e moderadamente aquecidas, variando conforme a espécie fúngica produtora. Fungos do gênero *Trametes* são reconhecidos como fontes eficientes de lacases, frequentemente exploradas para aplicações industriais (Tabela 06).

Tabela 06 Características das enzimas Lacase

Lacase	
Origens	Fungica
pH ótimo	Entre 3,0 e 6,0
Temperatura ótima	Entre 25 °C e 60 °C

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

8 PROCESSOS DE BENEFICIAMENTO TEXTÉIS TRADICIONAIS VERSUS ENZIMÁTICOS

8.1 Purga

A purga é uma etapa fundamental na preparação de tecidos, especialmente os de algodão, e tem como objetivo remover impurezas naturais como ceras, pectinas e hemiceluloses. Segundo Furlan (2012), enzimas como pectinases, amilases e celulasas podem ser empregadas nessa etapa, degradando seletivamente esses componentes e facilitando a limpeza do material. Essa ação enzimática melhora a eficiência do processo e reduz a necessidade de tratamentos agressivos.

8.1.1 Purga Tradicional

Segundo Furlan (2012), a purga tradicional era realizada por meio de processos fortemente alcalinos, utilizando hidróxido de sódio, surfactantes e temperaturas muitas vezes superiores a 100 °C. Essas condições severas provocavam degradação das fibras, perda de massa e alteração do toque e brilho do tecido. Além disso, geravam efluentes com pH elevado e alta carga orgânica (DQO/DBO), exigindo neutralização ácida e tratamento complexo. Esse método também demandava grande consumo de água e energia, aumentando o impacto ambiental do processo.

8.1.2 Purga enzimática (Biopurga)

A biopurga é uma alternativa sustentável que utiliza enzimas, principalmente pectinases e celulasas, atuando em condições mais amenas (50–60 °C) e em meio alcalino moderado, geralmente combinadas com tensoativos e agentes sequestrantes. A ação conjunta das enzimas aumenta a eficiência do processo: as pectinases degradam a pectina - que atua como uma “cola” que prende impurezas às fibras - enquanto as celulasas melhoram a limpeza e a uniformidade do tecido (Furlan, 2012).

Entre as vantagens da biopurga segundo Furlan (2012) estão:

- a redução do consumo de água devido ao menor número de lavagens;
- a menor demanda energética por operar em temperaturas mais baixas;

- a preservação da resistência das fibras;
- a melhoria do toque e da absorção de cor;
- geração de efluentes com menores níveis de DBO e DQO, facilitando o tratamento e diminuindo o impacto ambiental.

De acordo com Zille (2014), o uso dessas enzimas na biopreparação contribui para preparar adequadamente as fibras para etapas subsequentes, como alveijamento e tingimento, garantindo maior uniformidade e qualidade no processamento têxtil. Além disso, os tratamentos enzimáticos apresentam benefícios ambientais e operacionais, tornando o processo mais sustentável quando comparado aos métodos químicos convencionais.

8.2 Desengomagem

A engomagem é um processo utilizado na tecelagem que consiste na aplicação de uma película protetora sobre os fios, formando uma camada de goma que pode ser de origem natural ou sintética. Essa película envolve os fios de urdume, que sofrem maior atrito e tensão durante o tecimento, aumentando sua resistência mecânica e reduzindo rupturas, o que melhora o desempenho no tear e a qualidade do produto final (SENAI-SP, 2015).

A goma é uma mistura homogênea de materiais que, quando aquecidos, apresentam consistência viscosa, transformando-se em um filme sólido e elástico após a secagem. Sua formulação pode incluir amidos, polímeros sintéticos, agentes antiespuma e aditivos que ajustam viscosidade e aderência. A função principal é formar um filme contínuo que une fibras e filamentos, reduzindo deslizamento, desgaste e pilosidade do fio, além de proteger contra flexões e rupturas (Zille, 2014).

Segundo Giordano (2011), gomas podem ser classificados em naturais, artificiais e sintéticos:

- Naturais:
 - De origem animal: colas, gelatina, caseínas, sebo animal e ceras.
 - De origem vegetal: óleos hidrogenados ou sulfonados, ceras, óleo de coco e amidos (mandioca, batata, arroz, milho e trigo).

- Artificiais: dextrina e carboximetilcelulose (CMC).
- Sintéticos: parafinas, estearinas, poliacrilatos e álcool polivinílico (PVOH).

Ainda segundo Giordano (2011), a escolha do engomante depende do tipo de fibra: algodão (amidos, dextrinas, CMC, PVOH, poliacrilatos), viscose (CMC, PVOH), lã (CMC, PVOH), filamentos (PVOH, poliacrilatos) e misturas sintéticas/naturais (CMC, PVOH, dextrina, poliacrilatos). Cada engomante requer métodos específicos de desengomagem, conforme sua natureza química.

8.2.1 Desengomagem tradicional

Os métodos tradicionais de desengomagem consistem na utilização de agentes químicos ácidos, alcalinos ou oxidantes aplicados sob altas temperaturas, com o objetivo de solubilizar e remover os engomantes aplicados aos fios (Furlan, 2012).

De acordo com Furlan (2012), embora os métodos tradicionais de remoção de amidos e colas sejam eficazes, eles podem provocar degradação parcial das fibras, amarelamento, redução da resistência mecânica e acúmulo de impurezas nas máquinas, além de gerar efluentes com elevada carga poluente. Apesar desses impactos, ainda são amplamente utilizados na indústria devido ao baixo custo operacional.

Entre esses métodos tradicionais Furlan (2012) destaca:

- Dissolução alcalina: utiliza soda cáustica e umectantes em altas temperaturas ($\approx 100^\circ\text{C}$), proporcionando remoção eficiente do engomante, mas com acúmulo de resíduos na máquina e degradação parcial das fibras.
- Hidrólise ácida: emprega ácidos sulfúrico ou clorídrico, solubilizando engomantes minerais e orgânicos. Apesar do baixo custo, apresenta alto risco de danificar o substrato.
- Oxidação: aplicação de agentes oxidantes como persulfato de amônio, bromito de sódio e peróxido de hidrogênio, que promovem “queima lenta” do engomante, facilitando sua remoção.

- Auto-fermentação (imersão): método antigo de baixo custo, no qual o tecido é imerso em água por longo período, permitindo a degradação microbiana do amido, embora o processo seja lento e possa comprometer a resistência das fibras.

8.2.2 Desengomagem enzimática

A desengomagem enzimática utiliza amilases que transformam o amido insolúvel em dextrinas solúveis, facilitando a remoção com água. Esse método preserva a integridade das fibras, reduz consumo de energia e água e diminui a carga poluente dos efluentes (Zille, 2014).

Segundo Furlan (2012), a eficiência da desengomagem enzimática é influenciada por diversos fatores que afetam a atividade das enzimas, como insumos auxiliares, tempo e temperatura, pH, dureza da água e presença de contaminantes. O controle adequado dessas variáveis é fundamental para garantir a remoção completa dos engomantes, preservando a integridade das fibras e a qualidade do tecido.

A eficácia da desengomagem pode ser verificada por meio de testes simples que indicam a presença de amido residual:

- Coloração amarelada: indica ausência de amido;
- Coloração violeta: indica presença de amilopectina;
- Coloração azul: indica presença de amilose.

Uma lavagem prévia rigorosa é essencial para evitar falsos resultados causados por dextrinas solúveis.

Segundo Zille (2014), a desengomagem enzimática apresenta diversos benefícios em relação aos métodos químicos tradicionais:

- Remoção eficiente do amido sem degradar a celulose;
- Menor agressão química e mecânica às fibras;
- Redução de efluentes tóxicos;
- Maior uniformidade para tingimento e acabamento;

- Possibilidade de uso sinérgico com celulases e pectinases, aumentando a eficiência do processo.

8.3 Alvejamento

Segundo Giordano (2011), o alvejamento é o processo utilizado para remover impurezas que causam coloração amarelada em substratos têxteis. Pode ser realizado por oxidação (ganho de elétrons) ou redução química (perda de elétrons), visando a obtenção de tecidos com maior uniformidade e brilho.

8.3.1 Alvejamento tradicional

O processo de alvejamento têxtil pode ocorrer por oxidação ou redução química, dependendo do tipo de fibra e do efeito desejado. Na oxidação há incorporação de elétrons, enquanto na redução ocorre sua perda. Entre os principais agentes oxidantes utilizados destacam-se o hipoclorito de sódio (NaClO), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o clorito de sódio (NaClO_2). Já entre os redutores mais comuns estão o hidrossulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) e o formaldeído sulfoxilato de sódio ($\text{NaHSO}_2\text{CH}_2\text{O}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Giordano (2011).

O alvejamento têxtil pode ser realizado por diferentes métodos, conforme descrito por Giordano (2011), cada um adequado a tipos específicos de fibras e condições de processo:

- Hipoclorito de sódio: usado em fibras celulósicas, requer controle rigoroso de pH para evitar danos. Atua liberando oxigênio ativo em meio alcalino. Após o processo, faz-se a anticloragem com bissulfito de sódio. Não é indicado para fibras proteicas (lã e seda).
- Peróxido de hidrogênio: método mais comum, fornece branco mais brilhante e é menos agressivo. Exige pH entre 8,8 e 10,9 e temperatura

de 80–95 °C, com uso de estabilizadores para evitar decomposição. Aplica-se a fibras naturais, artificiais e sintéticas.

- Clorito de sódio: libera dióxido de cloro em meio ácido (pH 3,5–4,0), operando próximo à ebulição por cerca de 60 minutos. Indicado para fibras celulósicas e poliéster, requer equipamentos resistentes à corrosão.
- Hidrossulfito de sódio: promove alveamento redutivo, tornando impurezas incolores, mas pode haver reoxidação. Para temperaturas acima de 70 °C, usa-se formaldeído sulfoxilato de sódio. Indicado para misturas de fibras celulósicas e sintéticas.

Em resumo, a escolha do método depende do tipo de fibra e do efeito desejado, buscando equilibrar eficiência e preservação do material.

8.3.2 Alveamento enzimático

O alveamento enzimático é uma alternativa sustentável aos processos convencionais de branqueamento têxtil, pois utiliza enzimas como peroxidases e catalases para reduzir a carga química do tratamento. Essa técnica apresenta vantagens ambientais e operacionais, como menor consumo de água e energia, além da redução na formação de sais e subprodutos tóxicos (Cavaco-Paulo e Gübitz 2003).

De acordo com os autores Cavaco-Paulo e Gübitz (2003) o processo enzimático requer menor demanda de auxiliares, apresenta menor impacto ambiental e possibilita economia de energia e água quando comparado ao branqueamento químico tradicional. Por operar em condições mais brandas, contribui para preservar a integridade das fibras e evitar a oxidação de pigmentos sensíveis, podendo ser aplicado a fibras, fios, tecidos e malhas, frequentemente em combinação com branqueadores ópticos para alcançar brancura elevada

8.4 Estonagem

8.4.1 Estonagem tradicional

A estonagem tradicional, também conhecida como stone washing, é um processo de acabamento do denim que confere ao tecido aparência desgastada e amaciada, simulando o desgaste natural pelo uso prolongado. Esse método surgiu na década de 1970, com o objetivo de reproduzir o desbotamento natural do jeans. O processo envolve a lavagem do tecido em máquinas industriais com pedras abrasivas, como pedras-pomes, que promovem atrito e desgaste das fibras, removendo parte do corante índigo e proporcionando o efeito visual desejado. Conforme Tolkar (2021, p. 1):

“O processo de stone washing começa com a pré-lavagem dos tecidos para remover sujeiras ou impurezas. Em seguida, os tecidos são colocados em uma máquina de lavar industrial junto com pedras abrasivas e aditivos químicos especiais. À medida que a máquina agita as pedras contra o tecido, ocorre atrito e abrasão, amaciando as fibras e criando uma aparência desgastada.”

Apesar de eficiente na obtenção do efeito stonewashed, a técnica apresenta desvantagens, como desgaste excessivo das máquinas, geração de resíduos sólidos que necessitam de tratamento e elevado consumo de água e energia, o que levanta questões ambientais (Marroques, 2020).

8.4.2 Estonagem enzimática

A bioestonagem é um processo enzimático que utiliza celulasas para promover o desgaste controlado do tecido Denim, substituindo o uso tradicional da pedra-pomes e reduzindo o impacto ambiental. Segundo Marroques (2020), o método enzimático reproduz o efeito stonewashed com menor geração de resíduos e sem comprometer a resistência das fibras. Além disso, o uso de celulasas torna o tecido mais macio e agradável ao toque.

Para evitar o efeito backstaining, que consiste na redeposição do corante índigo sobre os fios, é essencial controlar o pH e a temperatura durante o processo, que deve ocorrer entre pH 5,5 e 8,0 e a cerca de 55 °C (Marroques, 2020). Dessa forma, a bioestonagem representa uma alternativa eficiente e sustentável para o beneficiamento do jeans.

9 PARTE EXPERIMENTAL

Para a realização dos experimentos, foi utilizado como substrato um tecido plano 100% algodão (CO), sarja 3×1, com gramatura de 290 g/m².

Todos os ensaios foram conduzidos no laboratório da Empresa Alpha, sob condições controladas, garantindo a reprodutibilidade e a precisão dos resultados obtidos.

9.1 Testes com o Tecido engomado

Nesta parte dos experimentos, foi utilizado como substrato um tecido plano 100% algodão (CO), sarja 3×1, com gramatura de 290 g/m², engomado com goma não identificada.

9.1.1 Produção de Indicador de Amido

Material necessário

- Iodo ressublimado;
- Iodeto de potássio P.A.;
- Água destilada;
- Baguetas;
- Béquer de 50 mL;
- Proveta de 1000 mL;
- Balão volumétrico 1000mL;
- Balança;
- Escala Tegewa.

Produzir indicador segundo receita:

- Foi dissolvido 10 g de iodeto de potássio em 100 mL de água destilada
- Foi adicionado 0,65 g de iodo, sendo a mistura agitada até completa dissolução.;
- A solução foi transferida para uma proveta de 1000 mL e completada com água até 800 ml;

- Em seguida, foi transferida para um balão volumétrico de 1000 mL e completada com água destilada até 1 litro, avolumando.

Determinação

- O tecido foi esticado no bastidor; quando o teste foi realizado em fios, os mesmos foram esticados sobre uma superfície limpa e plana.
- Foi pingada uma gota do indicador sobre o substrato, utilizando uma pipeta Pasteur.
- Foi utilizada a Ecala Tegewa (Figura 26) para avaliação da presença de goma.

Figura 26 - Escala Tegewa



Fonte: Alaminos (2021)

9.1.2 Produção de Indicador de PVAOH

Material necessário:

- Béquer de 50 mL;
- Balão volumétrico de 100ml;
- Iodo ressublimado;
- Iodeto de potássio P.A.;
- Ácido Bórico;
- Água destilada;
- Pipeta Pasteur;
- Bastidor.

Produzir indicador segundo receita:

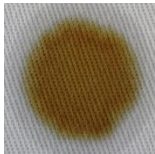

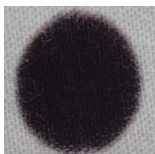
- Foi pesado 0,13 g de iodo ressublimado.

- Foram pesados 2,6 g de iodeto de potássio P.A. e 4,0 g de ácido bórico.
- Os reagentes foram transferidos para um balão volumétrico de 100 mL e a solução foi avolumada com água destilada.

Determinação:

- O tecido foi esticado no bastidor; quando o teste foi realizado em fios, estes foram esticados sobre uma superfície limpa e plana.
- Foi pingada uma gota do indicador sobre o substrato, utilizando a pipeta Pasteur.
- A presença de PVAOH foi avaliada a partir da tonalidade obtida: fraca presença (acastanhada), moderada presença (levemente azulada) e forte presença (azul escuro/arroxeadada) conforme Tabela 07.

Tabela 07 – Avaliação de presença de PVAOH através de conceito

Avaliação da presença de PVAOH		
Conceito	Coloração	Exemplo
Fraca presença	Acastanhada	
Moderada presença	Levemente azulada	
Forte presença	Azul escuro/arroxeadada	

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Observação: quanto mais acastanhada a coloração, menor a presença de PVAOH; quanto mais azulada, maior a presença.

9.1.3 Teste de desengomagem

Material necessário:

- Estufa
- Dessecador
- Balança analítica
- Chapa de aquecimento
- Espátula
- Pipeta Pasteur
- Bastão de vidro
- Becker de inox ou vidro
- Agitador mecânico
- Lavadora HT
- Foulard
- Água
- Alamilase
- Agente tensoativo para uso têxtil
- Cloreto de cálcio
- Sal
- Soda caustica 50%
- Solução indicadora de amido
- Ácido acético

Procedimento:

Preparo do corpo de prova:

- Cortar o tecido conforme o número de amostras necessárias e identificar as amostras;
- Deixar o tecido em estufa 105°C por 2 horas
- Retirar os tecidos da estufa e colocar no dessecador por 20 minutos para permitir o resfriamento do tecido;
- Retirar os tecidos do dessecador e seguir rapidamente para realizar a pesagem;
- Tomar nota dos pesos dos tecidos e identificá-los (P1).

Preparo de banho para desengomagem

-Pesar, em balança analítica, com o auxílio de um béquer, os produtos da receita conforme a Tabela 08:

Tabela 08 – Receita de Desengomagem

Ordem de Adição	Produto	Peso em gramas (g)
1	Água	988,88
2	Enzima Alfa amilase	5,00
3	Agente tensoativo para uso têxtil	1,00
4	Sal	5,00
5	Cloreto de Cálcio	0,12
Total		1000,00 g

Fonte: Receita interna da empresa Alfa

- Misturar todos os reagentes com o bastão de vidro;
- Verificar o pH e, caso necessário, ajustá-lo com ácido acético até atingir o valor de 6,0 a 6,5.

Aplicação de banho para desengomagem

- Colocar o banho no copo de lavagem da HT na proporção de R.B 1:10 com relação ao tecido;
- Colocar o corpo de prova no copo de lavagem;
- Elevar a temperatura a 65°C;
- Manter o banho por 1 hora após atingir a temperatura desejada;
- Preparar um béquer com soda caustica à 5g/L;
- Levar ao aquecimento até ultrapassar os 80°C;
- Retirar o corpo de prova do banho e colocá-lo na solução preparada, agitando por 5 minutos;
- Retirar o corpo de prova da solução e lavar em água corrente até completa neutralização;
- Passar o corpo de prova pelo Foulard a 2 bar;

Verificação da desengomagem

- Pingar o indicador de amido em uma das pontas do corpo de prova;
- Verificar a presença de amido, levar o corpo de prova à estufa por 2h a 105°C;
- Retirar os tecidos da estufa e colocar no dessecador por 20 minutos para que o tecido esfrie
- Retirar os tecidos do dessecador e seguir rapidamente para pesagem. Tomar nota dos pesos dos tecidos e identificá-los.
- Calcular a carga de goma com a fórmula:

$$\% \text{ Carga de goma} = \left(\frac{(P_1 - P_2) \times 100}{P_1} \right)$$

Utilize a escala Tewega para definir a nota de desengomagem.

9.1.4 Resultados dos testes com o tecido engomado

Verificação de presença de amido na amostra de tecido a ser utilizado:

Figura 27. Identificação da presença de amido no tecido a ser utilizado



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

O teste utilizando a escala Tegewa apresentou nota 1, indicando elevada presença de amido no tecido analisado (Figura 27).

Verificação de presença de PVAOH:

Figura 28. Identificação da presença de PVAOH no tecido a ser utilizado



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Utilizando a Tabela 06 – Avaliação de presença de PVAOH, foi identificada a coloração azul arroxeada, indicando forte presença de PVAOH (Figura 28).

Teste de desengomagem:

Abaixo valores encontrados na desengomagem de 8 amostras de tecidos, conforme receita e procedimento padrão, variando o pH e tempo do processo (Tabela 09).

Tabela 09 - Parâmetros de pH e temperatura aplicados nas condições experimentais.

Amostra	pH do banho de desengomagem	Tempo de tratamento
Amostra 01	3	30 min
Amostra 02	3	60 min
Amostra 03	5	30 min
Amostra 04	5	60 min
Amostra 05	7	30 min
Amostra 06	7	60 min
Amostra 07	13	30 min
Amostra 08	13	60 min

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na tabela 10, se encontram os resultados dos testes de Carga de goma nos testes realizados:









Tabela 10 - Resultados de carga de goma (%)

Amostra	Peso inicial da amostra	Peso final amostra	Carga de Goma (%)
Amostra 01	10,4	9,45	9,13 %
Amostra 02	10,8	9,64	10,74 %
Amostra 03	10,6	9,53	10,09 %
Amostra 04	10,8	9,68	10,37 %
Amostra 05	10,8	9,70	10,18 %
Amostra 06	10,6	9,50	10,37 %
Amostra 07	10,8	9,01	9,25 %
Amostra 08	10,8	9,30	9,72 %

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Podemos verificar os resultados visuais de presença de amido e PVAOH após os testes de desengomagem na Tabela 11:

Tabela 11 - Resultados de presença de amido (gota superior) e PVAOH (gota inferior) após os testes de desengomagem.

Resultados visuais obtidos após processo de desengomagem			
			
Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Amostra 04
			
Amostra 05	Amostra 06	Amostra 07	Amostra 08

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na tabela 12, se encontram os resultados de avaliação através da escala Tegewa (Figura 26) e pela Tabela de conceitos de PVAOH (Tabela 07):

Tabela 12- Avaliação Tegewa e PVAOH

Amostra	Nota Tegewa	Conceito PAVOH
Amostra 01	6	Fraca Presença
Amostra 02	7	Fraca Presença
Amostra 03	7	Fraca Presença
Amostra 04	7	Fraca Presença
Amostra 05	8	Fraca Presença
Amostra 06	8	Fraca Presença
Amostra 07	2	Forte Presença
Amostra 08	2	Forte Presença

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os testes de desengomagem realizados nas amostras de tecido demonstraram que o processo foi eficiente na remoção de amido e PVAOH em condições específicas. Antes da desengomagem, a análise indicou elevada presença de amido (nota 1 na escala Tegewa) e forte presença de PVAOH (coloração azul arroxeada).

Após a desengomagem, os resultados da carga de goma (Tabela 10) mostram que houve redução do conteúdo de goma em todas as amostras, variando entre 9,13% e 10,74%, indicando que o processo de remoção foi eficaz, embora a eficiência tenha variado conforme o pH e o tempo do tratamento.

A avaliação visual e quantitativa (Tabelas 11 e 12) evidenciou que:

- As amostras 01 e 02, submetidas a pH ácido, apresentaram resultados moderados na remoção de amido e PVAOH, recebendo notas 6 e 7 na escala Tegewa, respectivamente. A pequena diferença entre elas deve-se ao tempo de tratamento, sendo que a amostra 01 permaneceu menos tempo em desengomagem.
- Em pHs neutros (pH 5 a 7), as amostras 03, 04, 05 e 06, com tempos de 30 a 60 minutos, apresentaram redução significativa de amido e PVAOH, registrada como fraca presença. Entre elas, as amostras com pH 7 obtiveram os melhores resultados, recebendo nota 8 na escala Tegewa, indicando que condições próximas da neutralidade favorecem a eficiência do desengomante.
- Em condições alcalinas extremas (pH 13) amostras 07 e 08 independente do tempo de 30 ou 60 minutos, ainda apresentaram forte presença de amido e PVAOH, evidenciando menor eficiência do desengomante ou maior retenção de goma sob essas condições.

De forma geral, o pH mostrou-se o fator mais determinante na eficiência da desengomagem, interferindo mais nos resultados do que o tempo de tratamento, embora este também tenha influência leve, especialmente em pHs ácidos ou neutros.

9.2 Testes de Alveijamento

Nesta parte dos experimentos, foi utilizado como substrato um tecido plano 100% algodão (CO), sarja 3×1, com gramatura de 290 g/m², pronto para tingimento (PT)

9.2.1 Alveijamento

Material necessário:

- Substrato a ser alvejado
- Béquer
- Balança analítica
- Cronometro
- Bastão
- Foulard
- Estufa
- Equipamento HT
- pHmetro
- Dessecador
- Hidróxido de sódio 50%
- Peroxido de hidrogênio 50%
- Agente tensoativo para uso têxtil
- Agente sequestrante de ferro, cálcio e magnésio
- Enzima catalase.

Procedimento:

Preparo do corpo de prova:

- Cortar o substrato (tecido) livre de gomas em dimensões aproximadas 21cm x 29,7cm (folha A4);
- Deixar o tecido em estufa 105°C por 2 horas;
- Retirar os tecidos da estufa e colocar no dessecador por 20 minutos para que o tecido esfrie;
- Retirar os tecidos do dessecador e seguir rapidamente para pesagem. Tomar nota dos pesos dos tecidos e identificá-los (P1)

Preparo do banho de alvejamento (Tabela 13):

Tabela 13 – Receita de Alvejamento

Ordem de Adição	Produto	g/l
1	Agente tensoativo para uso têxtil	2,00
2	Agente sequestrante de ferro, cálcio e magnésio	0,50
3	Hidróxido de sódio 50%	3,00
4	Peróxido de hidrogênio 50%	2,00

Fonte: Receita interna da empresa Alfa

- Preparar o banho com razão de banho (R.B.) 1:10;
- Levar os tecidos para tratamento em equipamento HT a 98°C por 30 minutos;
- Resfriar o banho para 40 °C, retirar 70% do volume e completar com 70 mL de água, adicionando a concentração indicada de enzima catalase;
- Retornar as canecas ao equipamento HT e deixar o banho em circulação por 5 minutos a 40 °C;
- Após o tempo decorrido, retirar novamente 70% do banho, completar com 70 mL de água e manter circulação por 5 minutos a 60 °C;
- Retirar todo o banho e colocar 100 ml de água, devolva as canecas ao equipamento HT e deixe o equipamento rodando por 5 minutos a frio;
- Fourladar o tecido a 2 bar;
- Secar o tecido em estufa a 40 °C até atingir secagem completa.
- Realizar a leitura em espectrofotômetro do grau de brancura.

9.2.2 Determinação de concentração de peróxido de hidrogênio com QUANTOFIX® Peroxide 25

Procedimento:

- Mergulhar a tira de teste na solução a ser analisada por 1 segundo;
- Agitar suavemente a tira para remover o excesso de líquido;
- Deixar a tira reagir por 15 segundos.

- Comparar a cor do campo de teste com a escala de cores fornecida. Se houver presença de H_2O_2 , o campo de teste ficará azul.

Observação: caso a concentração de peróxido de hidrogênio seja elevada e se pretenda realizar um teste comparativo, recomenda-se preparar soluções diluídas, a fim de medir a concentração com maior segurança.

9.2.3 Resultados dos testes de alvejamento

Foram realizados seis alvejamentos, utilizando as concentrações de enzima catalase segundo a Tabela 14:

Tabela 14 - Concentração de enzima catalase aplicada em cada amostra testada.

Amostra	Concentração de catalase utilizada (%)
Amostra 01	0,05
Amostra 02	0,10
Amostra 03	0,20
Amostra 04	0,30
Amostra 05	0,40
Amostra 06	0,50

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Realizou-se a medição do grau de brancura das amostras utilizando espectrofotômetro, como mostrado na Figura 29:

Figura 29 - Medição do grau de brancura das amostras por espectrofotometria.

Standard: Desengomado

SCI100 D65 - 10° CIE L*a*b*

Name	L*	a*	b*	C*	h°	DL*	Da*	Db*	DC*	DH*	DE*ab	Color Assessments			Tint CIE	dTint CIE	Tint Griesser	dTint Griesser	WI Berger	WI CIE-94	dWI CIE	WI Griesser	dWI Griesser	
Std Desengomado	87,87	1,73	10,99	11,13	81,08									-7,63		-8,22		22,40	18,24		-47,30			
1 Amostra 01	94,10	-0,15	5,41	5,41	91,63	6,43	-1,88	-5,58	-5,72	1,43	8,72	FAIL	Lighter	Less Red	Less Yellow	-1,79	5,85	0,03	6,25	59,39	60,74	42,50	30,31	77,61
2 Amostra 02	94,27	-0,13	5,43	5,43	91,35	6,59	-1,86	-5,56	-5,70	1,39	8,82	FAIL	Lighter	Less Red	Less Yellow	-1,83	5,80	-0,02	6,19	59,56	61,09	42,84	30,60	77,90
3 Amostra 03	94,18	-0,17	5,52	5,52	91,78	6,51	-1,90	-5,48	-5,81	1,46	8,71	FAIL	Lighter	Less Red	Less Yellow	-1,79	5,84	0,03	6,24	59,07	60,46	42,22	29,46	78,76
4 Amostra 04	94,11	-0,17	5,61	5,61	91,78	6,43	-1,90	-5,38	-5,52	1,48	8,60	FAIL	Lighter	Less Red	Less Yellow	-1,83	5,81	0,00	6,21	58,50	59,85	41,60	28,31	75,61
5 Amostra 05	94,16	-0,19	5,51	5,51	91,97	6,49	-1,92	-5,49	-5,62	1,49	8,71	FAIL	Lighter	Less Red	Less Yellow	-1,76	5,87	0,06	6,28	59,12	60,46	42,22	28,52	76,62
6 Amostra 06	94,21	-0,19	5,57	5,57	92,00	6,54	-1,92	-5,43	-5,56	1,50	8,71	FAIL	Lighter	Less Red	Less Yellow	-1,77	5,86	0,05	6,27	58,82	60,30	42,05	29,02	76,32

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Tabela 15 - Valores encontrados de Δ CIE

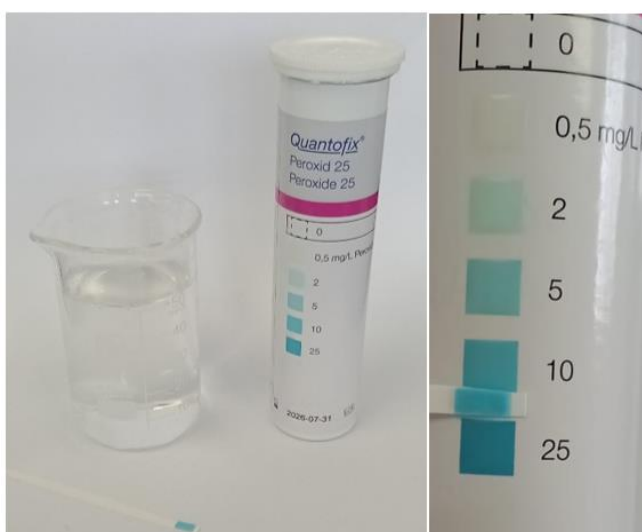
Amostra	Valor encontrado de Δ CIE – Grau de Brancura
Tecido desengomado	18,24
Amostra 01	60,74
Amostra 02	61,09
Amostra 03	60,46
Amostra 04	59,85
Amostra 05	60,46
Amostra 06	60,30

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Conforme abordado neste trabalho, a enzima catalase decompõe o excesso de peróxido de hidrogênio, protegendo o tecido contra danos oxidativos. Entretanto, ao neutralizar o peróxido precocemente, a catalase pode interromper parcialmente o processo de branqueamento, influenciando ligeiramente o grau de brancura final. Dessa forma, torna-se necessário estabelecer um equilíbrio entre a preservação das fibras e a obtenção do branco desejado.

O teste com QUANTOFIX® Peroxide 25 (Figura 30), teve como objetivo verificar a concentração de peróxido de hidrogênio nos banhos do primeiro enxágue do processo de alvejamento. Para isso, foi retida uma amostra equivalente a 70% do banho descartado, e realizou-se uma diluição na proporção de 1:10 dessa amostra.

Figura 30. Realização de teste utilizando Quantofix Peroxid 25



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os valores encontrados foram registrados na Tabela 16:

Tabela 16 - Valores de concentração de peróxido de hidrogênio nas amostras, determinados pelo teste QUANTOFIX® Peroxide 25.

Amostra	Concentração de catalase utilizada (%)	Valor Encontrado
Amostra 01	0,05	5
Amostra 02	0,10	5
Amostra 03	0,20	3
Amostra 04	0,30	2
Amostra 05	0,40	1
Amostra 06	0,50	0,5

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Os resultados obtidos por meio do teste QUANTOFIX® Peroxide 25 evidenciam uma relação inversamente proporcional entre a concentração de enzima catalase e o teor residual de peróxido de hidrogênio presente nos banhos do primeiro enxágue (Figura 31).

Figura 31. Resultados do teste QUANTOFIX® Peroxide 25 para as amostras 01 a 06, dispostas da direita para a esquerda.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Observa-se que, nas amostras com menores concentrações de catalase (0,05% e 0,10%), o valor residual de peróxido manteve-se em 5 mg/L, indicando que a decomposição do H_2O_2 foi parcial. À medida que a concentração enzimática aumentou, verificou-se uma redução gradativa dos valores de peróxido residual, chegando a 0,5 mg/L na amostra com 0,50% de catalase.

Assim, o aumento da concentração de catalase favoreceu a remoção mais completa do peróxido residual após o processo de alvejamento, contribuindo para um enxágue mais seguro e reduzindo o risco de danos oxidativos às fibras de algodão ou interferências em etapas subsequentes, como tingimento e acabamento

10 CONCLUSÃO

Os experimentos realizados evidenciaram a eficiência dos processos enzimáticos na desengomagem e no alveijamento de tecidos de algodão, confirmando o potencial dessas biotecnologias como alternativas mais sustentáveis e seletivas aos métodos químicos tradicionais.

A ação das enzimas ocorre por meio da redução da energia de ativação das reações, permitindo que as transformações químicas aconteçam em condições mais brandas de temperatura e pH, o que resulta em menor consumo energético e menor degradação das fibras têxteis (Zille, 2014). Essa característica foi claramente observada nas etapas experimentais, nas quais pequenas variações de pH e tempo influenciaram significativamente o desempenho catalítico e, conseqüentemente, a eficiência dos processos.

Na desengomagem, verificou-se que as enzimas alfa amilases atuaram de forma mais eficiente em faixas de pH próximas da neutralidade (pH 5 a 7), nas quais as amostras apresentaram maior remoção de amido e PVAOH. Em meios muito ácidos ou alcalinos, a atividade enzimática foi reduzida, refletindo a sensibilidade da estrutura proteica das enzimas a condições extremas. O tempo de tratamento também mostrou influência secundária, favorecendo resultados levemente superiores quando mantido por 60 minutos.

No alveijamento enzimático, o aumento gradual da concentração de catalase promoveu decomposição mais completa do peróxido de hidrogênio residual, demonstrando a importância da proporção enzimática na eficiência da reação. Concentrações mais elevadas resultaram em valores residuais mínimos de peróxido, garantindo um enxágue mais seguro e evitando danos oxidativos às fibras.

Dessa forma, os processos enzimáticos mostraram-se tecnicamente eficazes e ambientalmente vantajosos, operando em condições suaves e seletivas, com menor uso de produtos químicos agressivos e menor geração de efluentes. A combinação de parâmetros adequados de pH, tempo e concentração enzimática revelou-se essencial para o máximo aproveitamento da atividade catalítica, reforçando que a aplicação controlada dessas biotecnologias pode otimizar a qualidade do tecido e reduzir significativamente o impacto ambiental dos processos têxteis.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Ana Júlia Correia de. **Impactos ambientais do beneficiamento têxtil e alternativas sustentáveis através do conceito de Química Verde**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Têxtil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022. Acesso em: http://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/244936/TCC_Final_-_Ana_Julia_Araujo.pdf. Acesso em: 04 de set. de 2025

ALAMINOS, Isabel Maria Maia. **Otimização dos processos de tratamento enzimático de materiais celulósicos com amilases e celulasas**. 2021. Dissertação (Mestrado em Química Têxtil) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, 2021. Acesso em: <https://rep-dspace.uminho.pt/server/api/core/bitstreams/64d09ad0-48d1-4f3f-a3bc-0c08a1856deb/content>. Acesso em: 20 de out. de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO – ABIT. **Perfil do setor têxtil**. São Paulo: ABIT, 2024. Acesso em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor>. Acesso em: 2 de out. de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM – ABRE. **Mercado global de enzimas industriais deverá atingir US\$ 17,77 bilhões até 2035**. Acesso em: <https://www.abre.org.br/inovacao/mercado-global-de-enzimas-industriais-devera-atingir-us-1777-bilhoes-ate-2035/>. Acesso em: 19 de out. de 2025.

BRASIL. **Decreto nº 6.041**, de 8 de fevereiro de 2007. Institui a Política de Desenvolvimento Produtivo. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 fev. 2007. Acesso em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/decreto/d6041.htm. Acesso em: 19 de out. de 2025.

BRITANNICA. **Edmund Cartwright**. Acesso em: <https://www.britannica.com/biography/Edmund-Cartwright>. Acesso em: 9 de out. de 2025.

CAVACO-PAULO, A.; GÜBITZ, G. M. **Textile processing with enzymes**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2003

DE LA PEÑA, Marcos; GARCÍA-ROBLES, Inmaculada; CERVERA, Amelia. **The Hammerhead Ribozyme: A Long History for a Short RNA**. *Molecules*, v. 22, n. 1, p. 78, 2017. Acesso em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/22/1/78>. Acesso em: 01 de nov. de 2025.

DHANDE, Sagar. **What are allosteric Enzymes, Definition, Examples and Regulation. Biology Notes.** Acesso em: <https://www.biologynotes.in/2024/03/what-are-allosteric-enzymes-definition.html>. Acesso em: 19 de out. de 2025.

ESQUIRE. **This Trendy But Toxic Shade of Green Left Thousands Dead in the Victorian Era.** Acesso em: <https://www.esquiremag.ph/the-good-life/pursuits/paris-green-history>. Acesso em: 9 de nov. de 2025.

FURLAN, F. R. **Caracterização e aplicação de enzimas de forma combinada na biopreparação de tecidos felpudos de algodão.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012

GIORDANO, João Batista. **Aplicação de enzimas na indústria têxtil.** Projeto de Iniciação Científica – FATEC Americana, 2012.

GIORDANO, João Batista. **Apostila Beneficiamento têxtil.** 2011. 152 p.

INFOESCOLA. **Complexo chave e fechadura – Enzimas** – Bioquímica. Acesso em: <https://www.infoescola.com/bioquimica/complexo-chave-e-fechadura/>. Acesso em: 10 de nov. de 2025.

NELSON, David L.; COX, Michael M. **Princípios de Bioquímica de Lehninger.** Tradução de Carla Dalmaz, Carlos Termignoni, Maria Luiza Saraiva-Pereira e Tiele Patricia Machado. 8. ed. Porto Alegre: Artmed, 2022.

LEWIS, S. E.; STONE, T. L. **Biochemistry, Proteins, Enzymes. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL),** 2023. Acesso em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554536/>. Acesso em: 10 de out. de 2025.

LEWIS, T.; STONE, W. L. **Biochemistry, Proteins & Enzymes. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing,** 2023—. Acesso em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK554481/>. Acesso em: 11 de nov. de 2025.

LINGOLANDEDU. **Enzimas: o que são, função, exemplos e tipos.** Acesso em: <https://lingolandedu.com/enzimas/>. Acesso em: 10 de nov. de 2025.

MAESTRO VIRTUALE. **Celulase: características, estrutura, funções.** Acesso em: <https://maestrovirtuale.com/celulase-caracteristicas-estrutura-funcoes/>. Acesso em: 19 de ago. de 2025.

MARROQUES, G. R. **Processos biotecnológicos no beneficiamento têxtil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2020.

MONTEIRO, Valdirene N.; SILVA, Roberto do Nascimento. **Aplicações industriais da biotecnologia enzimática**. Revista Científica Processos Químicos, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 1–10, maio 2009. Acesso em: https://senaigoias.com.br/repositoriosites/repositorio/senai/download/Publicacoes/Revista_Cientifica_Processos_Quimicos_/2010/processosquimicos_052009.pdf. Acesso em: 10 de nov. de 2025.

MUNDO EDUCAÇÃO. **Enzimas: o que são e como funcionam**. Acesso em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/enzimas.htm>. Acesso em: 19 de out. de 2025.

NEOPROSPECTA. **Uso de enzimas industriais cresce com a Biologia Molecular**. Blog Neoprospecta, 2022. Acesso em: <https://blog.neoprospecta.com/enzimas-industriais-biologia-molecular>. Acesso em: 19 de out. de 2025.

PEZZOLO, D. B. **Tecidos: tramas, tipos e usos**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2007. 328 p.

PIMENTEL, Fernando V. **Cenário atual da indústria têxtil nacional e suas estratégias para o futuro**. São Paulo: ABIT, 7 ago. 2025. Acesso em: <https://www.abicol.org/wp-content/uploads/2025/08/Cenario-atual-da-industria-textil-nacional-e-suas-estrategias-para-o-futuro.pdf>. Acesso em: 23 de set. de 2025.

ROBINSON, Peter K. Enzymes: principles and biotechnological applications. United States National Library of Medicine, PubMed Central, 2015. Acesso em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4692135/>. Acesso em: 19 de out. de 2025.

SENAI-SP. **Tecnologia dos Processos Têxteis**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2015. 116 p.

SU, Yuan; LIU, Chuan; FANG, Huan; et al. Bacillus subtilis: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. Microbial Cell Factories, v. 19, art. 173, 3 set. 2020. Acesso em: <https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12934-020-01436-8>. Acesso em: 14 de ago. de 2025.

TAREA EDUCATIVA. **Clasificación de enzimas.** Acesso em: https://www.tareaeducativa.com/clasificacion/clasificacion_de_enzimas.html. Acesso em: 19 de out. de 2025.

THERASCIENCE. **Protease – Benefits, Origin, Sources, Properties.** https://www.therascience.com/en_int/our-active-ingredients/enzymes/protease. Acesso em: 19 de out. de 2025.

TOLKAR. **The Art of Stone Washing: Transforming Denim**, 2021. Acesso em: <https://www.tolkar.com/blogs/the-art-of-stone-washing/>. Acesso em: 20 de out. de 2025.

WESTERN OREGON UNIVERSITY. CH450 and CH451 **Biochemistry: Defining Life at the Molecular Level – Chapter 7: Catalytic Mechanisms of Enzymes.** Acesso em: <https://wou.edu/chemistry/courses/online-chemistry-textbooks/ch450-and-ch451-biochemistry-defining-life-at-the-molecular-level/chapter-7-catalytic-mechanisms-of-enzymes/>. Acesso em: 10 de set. de 2025.

WESTERN OREGON UNIVERSITY. **Foundations of Biochemistry – Chapter 6.5 to 6.8 Slides.** Monmouth, OR: WOU Chemistry Department, 2021. Acesso em: <https://cdn.wou.edu/chemistry/files/2021/08/Lecture-6.5-6.8-PDF-Notes.pdf>. Acesso em: 10 de set. de 2025.

Wikimedia Commons. **Gráfico de Coenzima.** Acesso em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gr%C3%A1fico_de_Coenzima.svg. Acesso em: 19 de out. de 2025.

WOLFENDEN, Richard; SNIDER, Charles A. **The depth of chemical time and the power of enzymes as catalysts.** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 98, n. 3, p. 494–497, 2001. Acesso em: <https://www.pnas.org/content/98/3/494>. Acesso em: 10 de nov. de 2025.

WORLD HISTORY ENCYCLOPEDIA. **The Textile Industry in the British Industrial Revolution.** Acesso em: <https://www.worldhistory.org/article/2183/the-textile-industry-in-the-british-industrial-rev/>. Acesso em: 9 de out. de 2025.

ZILLE, Andrea. **A biotecnologia aplicada aos materiais têxteis.** Guimarães: Universidade do Minho, Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, 2014. Acesso em: <https://hdl.handle.net/1822/32207>. Acesso em: 14 de set. de 2025.