



---

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

LÍSSIA MUTERLE

LUCIANA DO NASCIMENTO OLIVEIRA CUSTÓDIO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ENZIMAS CELULÓSICAS NO  
PROCESSO DE STONEWASH SOB DIFERENTES CONDIÇÕES  
DE APLICAÇÃO**

**AMERICANA, SP**

**2025**

LÍSSIA MUTERLE  
LUCIANA DO NASCIMENTO OLIVEIRA CUSTÓDIO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ENZIMAS CELULÓSICAS NO  
PROCESSO DE STONEWASH SOB DIFERENTES CONDIÇÕES  
DE APLICAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido em cumprimento à exigência curricular do Curso Superior de Tecnologia em Produção têxtil sob a orientação do Prof. Dr. Daives Arakem Bergamasco.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Beneficiamento Têxtil

**AMERICANA, SP  
2025**

MUTERLE, Líssia

Avaliação do efeito de enzimas celulósicas no processo de stonewash sob diferentes condições de aplicação. / Líssia Muterle, Luciana do Nascimento Oliveira Custódio – Americana, 2025.

96f.

Monografia (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. Daives Arakem Bergamasco

1. Beneficiamento têxtil 2. Biotecnologia 3. Têxtil – processos industriais. I. MUTERLE, Líssia, II. CUSTÓDIO, Luciana do Nascimento Oliveira III. BERGAMASCO, Daives Arakem IV. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi

CDU: 677027

579:332.6

677.02

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

LÍSSIA MUTERLE  
LUCIANA DO NASCIMENTO OLIVEIRA CUSTÓDIO

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ENZIMAS CELULOSICAS NO  
PROCESSO DE STONEWASH SOB DIFERENTES CONDIÇÕES  
DE APLICAÇÃO**

Trabalho de graduação apresentado como exigência parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Produção Têxtil pelo CEETEPS/Faculdade de Tecnologia de Americana "Ministro Ralph Biasi".  
Área de concentração: Beneficiamento Têxtil

Americana, 25 de junho de 2025.

**Banca Examinadora:**



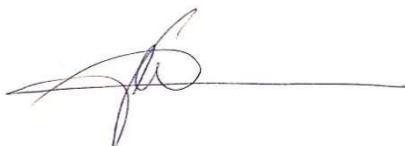
---

Daives Arakem Bergamasco (Presidente)  
Doutor  
Fatec Americana – Ministro Ralph Biasi



---

Valdecir José Tralli (Membro)  
Mestre  
Fatec Americana – Ministro Ralph Biasi



---

Alex Paulo Siqueira Silva (Membro)  
Mestre  
Fatec Americana – Ministro Ralph Biasi

## **DEDICATÓRIA**

Dedico a conclusão deste curso aos meus pais, que sempre me apoiaram com amor, dedicação e sabedoria. Foram seus exemplos de coragem e perseverança que me motivaram a seguir em frente e acreditar em cada passo desta caminhada. Esta conquista é fruto de tudo o que aprendi com vocês.

Também dedico ao professor Daives, nosso orientador e coordenador do curso, por sua incansável dedicação, paciência e respeito às nossas limitações. Agradeço o carinho, por acreditar em nós mesmo nos momentos de incerteza, e por transmitir com tanto amor o seu conhecimento. Sua paixão pela profissão nos inspirou a sermos melhores a cada dia. Muito obrigada por caminhar conosco nessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me sustentado em cada momento desta caminhada, renovando minhas forças nos dias difíceis e guiando meus passos com sabedoria e fé.

Aos professores, minha profunda gratidão por cada ensinamento compartilhado, pela paciência, pelo exemplo e por terem contribuído não apenas com o meu aprendizado, mas também com meu crescimento pessoal.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, meu muito obrigado por cada palavra de incentivo, pelas conversas, risadas e por tornarem essa jornada mais leve e inesquecível.

Levo comigo não apenas um diploma, mas uma trajetória repleta de aprendizado, afeto e gratidão.

## RESUMO

O presente trabalho aborda o comportamento da enzima celulósica em diferentes ambientes de água, com foco nos processos de acabamento têxtil, especialmente o *Stone Wash*. A enzima celulósica tem papel fundamental na degradação controlada da celulose presente nas fibras de algodão, promovendo efeitos desejados no aspecto e no toque do tecido. O estudo foi desenvolvido em condições controladas, variando os parâmetros de dureza, pH e temperatura da água, com o objetivo de avaliar a influência desses fatores na ação da enzima. Os resultados indicaram que ambientes com água de dureza elevada e pH extremos prejudicam a eficiência enzimática, enquanto condições neutras e água sem dureza proporcionam melhor desempenho. Este estudo contribui para o aprimoramento dos processos industriais de lavagem de tecidos denim, destacando a importância do controle dos parâmetros da água no uso de enzimas celulósicas.

Palavras-chave: Enzima celulósica. Acabamento têxtil. Dureza da água. pH. *Stone wash*.

## **ABSTRACT**

This study addresses the behavior of cellulase enzymes in different water environments, focusing on textile finishing processes, especially stone washing. Cellulase enzymes play a crucial role in the controlled degradation of cellulose present in cotton fibers, promoting desirable effects on the fabric's appearance and feel. The study was conducted under controlled conditions, varying parameters such as water hardness, pH, and temperature, with the aim of evaluating the influence of these factors on enzymatic activity. The results indicated that environments with high water hardness and extreme pH values negatively affect enzymatic efficiency, while neutral conditions and soft water lead to better performance. This research contributes to the improvement of industrial processes for washing denim fabrics, highlighting the importance of controlling water parameters when using cellulase enzymes.

Keywords: Cellulase enzyme. Textile finishing. Water hardness. pH. Stone wash.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Campo de Algodão .....	17
Figura 2 - Corte longitudinal de um caroço de algodoeiro <i>Gossypium hirsutum</i> L. ...	20
Figura 3 - Abridor de Fardos .....	29
Figura 4 - Fio Convencional .....	30
Figura 5 - Abridor e alimentador automático de fardos .....	31
Figura 6 - Véu e Fita produzida pela carda .....	32
Figura 7 - Trem de estiragem, dos passadores.....	32
Figura 8 - Penteadeira, rolos de manta de alimentação e fitas .....	33
Figura 9 - Maçaroqueira alimentada por fitas de passadores e pavios .....	33
Figura 10 - Pavios transformados em fios e espulas.....	34
Figura 11 - Preparação de fios .....	34
Figura 12 - Conicaleira, fusos e bobinas de fio .....	35
Figura 13 - Ilustração: Torções Z e S .....	36
Figura 14 - Esquema de uma fiação de rotor .....	36
Figura 15 - Filatório rotor com fitas de alimentação e bobinas de fios .....	37
Figura 16 - Planta <i>Indigofera Tinctoria</i> .....	39
Figura 17 - Corante índigo.....	40
Figura 18 - Adolf Von Baeyer, 1905 .....	42
Figura 19 - Fio de algodão com tingimento índigo .....	44
Figura 20 - Máquina de tingimento em corda (RopeDye).....	47
Figura 21 - Máquina de tingimento multi-caixas (Slasher Dye) .....	48
Figura 22 - Máquina Loop dyeing.....	50
Figura 23 - Fio sem goma / Fio engomado .....	51
Figura 24 - Amido de milho natural .....	53
Figura 25 - PVA.....	54
Figura 26 - Fluxo de Processo de Fabricação do PVA.....	55
Figura 27 - CMC (CARBOXIMETILCELULOSE).....	56
Figura 28 - Poliacrilato .....	57
Figura 29 - Mecanismo de funcionamento dos teares.....	58
Figura 30 - Tela ou tafetá .....	59
Figura 31 - Sarja.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do algodão.....	22
Tabela 2 - Classificação das Enzimas.....	73
Tabela 3 - Enzimas nos Processos Têxteis .....	74
Tabela 4 - Tolerâncias método Grab – ASTM D 6554 .....	89
Tabela 5 - Resultados de resistência a tração pelo método Grab Trama (N) .....	90

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	17
2.1	O QUE É O ALGODÃO?.....	17
2.1.1	O DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAÇÕES DE ALGODÃO NO BRASIL E NO MUNDO.....	17
2.1.2	A PRODUÇÃO DE ALGODÃO NO BRASIL E NO MUNDO ATUALMENTE.....	18
2.1.3	ASCENSÃO DO ALGODÃO E ESTAGNAÇÃO AÇUCAREIRA.....	19
2.1.4	O QUE SÃO FIBRAS DE ALGODÃO, COMO SE FORMAM E CRESCEM. 20	
2.1.5	FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DO ALGODÃO.....	23
2.1.6	CULTURAIS MÉTODOS DE CULTIVO.....	23
2.1.7	CLIMÁTICAS CHUVAS.....	23
2.1.8	MECÂNICAS.....	24
2.1.9	CLASSIFICAÇÃO DO ALGODÃO.....	24
2.1.10	Classificação por Qualidade Física (Preparação).....	25
2.1.11	Corte da Fibra ( <i>Gin Cut</i> ).....	25
2.1.12	CARACTERÍSTICAS DA FIBRA DE ALGODÃO.....	27
2.1.13	BENEFICIAMENTO DO ALGODÃO.....	28
2.1.14	PESAGEM, AVALIAÇÃO DE UMIDADE E VARIEDADE.....	28
2.1.15	DESMANCHE DO FARDÃO, PRÉ-LIMPEZA DO ALGODÃO.....	28
2.1.16	DESCAROÇAMENTO E LIMPEZA DA PLUMA.....	29
2.1.17	ENFARDAMENTO E PRENSAGEM.....	29
2.2	FIAÇÃO.....	30
2.2.1	FIAÇÃO CONVENCIONAL.....	30

2.2.2	ABERTURA AUTOMÁTICA OU MANUAL .....	30
2.2.3	BATEDORES.....	31
2.2.4	CARDAS.....	31
2.2.5	PASSADORES .....	32
2.2.6	REUNIDEIRAS/PENTEADEIRAS.....	32
2.2.7	MAÇAROQUEIRA .....	33
2.2.8	FILATÓRIOS .....	34
2.2.9	BOBINADEIRAS/CONICALEIRAS .....	34
2.2.10	RETORCEDEIRAS.....	35
2.2.11	DIREÇÃO DA TORÇÃO.....	35
2.2.12	FIAÇÃO OPEN END .....	36
2.2.13	ABERTURA AUTOMÁTICA OU MANUAL.....	37
2.2.14	BATEDORES .....	37
2.2.15	CARDAS .....	37
2.2.16	PASSADORES.....	37
2.2.17	FILATÓRIOS OPEN END (ROTOR).....	37
2.2.18	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS .....	38
2.2.19	QUALIDADE DA FIBRA, INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E UMIDADE.....	38
2.2.20	ERGONOMIA E SEGURANÇA NO TRABALHO EM FIAÇÃO .....	38
2.2.21	INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA FIAÇÃO .....	38
2.3	HISTÓRIA DO ÍNDIGO .....	39
2.3.1	Corante índigo .....	40
2.3.2	Índigo Sintético .....	41
2.3.3	Práticas Tradicionais e o Processo Industrial de Tingimento .....	42
2.3.4	Considerações sobre o Processo de Tingimento .....	43
2.3.5	Características do Tingimento .....	44

2.3.6	Formas de Comercialização do Corante Índigo.....	44
2.3.7	Principais fornecedores incluem.....	45
2.3.8	Índigo Normal e Índigo Pré-Reduzido.....	45
2.3.9	Tipos de Máquinas para Tingimento com Índigo.....	45
2.3.10	Tecnologias de Tingimento.....	46
2.3.11	Principais vantagens:.....	46
2.3.12	Principais desvantagens:.....	46
2.3.13	<i>Slasher Dye</i> (Multi-Caixas).....	47
2.3.14	Principais vantagens.....	48
2.3.15	Principais desvantagens.....	48
2.3.16	<i>Loop Dye</i> ( <i>Loop</i> ou <i>Girotex</i> ).....	49
2.3.17	Principais vantagens.....	49
2.3.18	Principais desvantagens.....	49
2.4	O QUE É ENGOMAGEM.....	51
	Segundo Pessanha (1989, apud Ponce,2025), engomar é revestir o fio (fiado Figura 23) ou de filamento com uma película (filme), chamada de goma, que pode ser natural ou sintética.....	51
2.4.1	O QUE É A GOMA.....	51
2.4.2	O OBJETIVO DA ENGOMAGEM.....	51
2.4.3	FUNÇÃO DA GOMA SOBRE O FIO.....	52
2.4.4	TIPOS DE GOMAS / BASE DA FÓRMULA.....	52
2.4.5	FÉCULA OU AMIDOS.....	52
2.4.6	PVA (ÁLCOOL POLIVINÍLICO).....	54
2.4.7	CMC (CARBOXIMETILCELULOSE).....	55
2.4.8	PAC (POLIACRILATO).....	56
2.4.9	PAC (POLIACRILATO).....	57
2.5	TECELAGEM.....	58

2.5.1	TECELAGEM DE DENIM .....	60
2.5.2	LIGAMENTO SARJA .....	62
2.6	DESENGOMAGEM.....	65
2.6.1	Desengomagem enzimática .....	66
2.7	BIOTECNOLOGIA.....	68
2.7.1	O que são as Enzimas.....	70
2.7.2	Bioestonagem.....	74
3	MÉTODOS E PROCESSOS .....	77
3.1	EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS .....	77
3.1.1	SUBSTRATO.....	79
3.1.2	Resistência à Ruptura e Alongamento de Tecidos Têxteis – Método ASTM D 6554.....	87
4	RESULTADOS.....	89
4.1	Análise dos Resultados Obtidos nos Ensaios .....	90
5	CONCLUSÃO .....	92
	REFERÊNCIAS.....	94

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria têxtil, em particular o segmento do jeanswear, encontra-se em uma busca contínua por aprimoramento de seus processos de acabamento, visando não apenas a garantia de qualidade e eficiência, mas também a redução de impactos ambientais. Nesse cenário, a aplicação de enzimas celulósicas no processo de lavagem de tecidos denim tem se destacado como uma alternativa promissora, promovendo efeitos estéticos e funcionais desejados, ao mesmo tempo em que substitui, em parte, o uso de produtos químicos agressivos. A enzima celulósica, ao atuar na degradação controlada da celulose presente nas fibras de algodão, possibilita o desenvolvimento do característico efeito *Stone Wash*, conferindo ao tecido um aspecto envelhecido e um toque macio. A motivação para este trabalho reside na crescente necessidade de otimizar essas técnicas, alinhando as demandas industriais com práticas mais sustentáveis e ecologicamente responsáveis.

Contudo, a eficácia da enzima celulósica é intrinsecamente dependente de variáveis ambientais cruciais, como a dureza da água, o pH e a temperatura, que podem influenciar diretamente a estrutura da celulose e a atividade enzimática. O problema de pesquisa central deste estudo, portanto, concentra-se em investigar como essas condições específicas da água afetam o desempenho da enzima celulósica em aplicações têxteis. Busca-se responder a questões fundamentais sobre a influência das variações na dureza da água, nos níveis de pH e nas diferentes temperaturas sobre a eficiência enzimática e, conseqüentemente, sobre a qualidade final dos tecidos denim submetidos ao processo de *Stone Wash*.

Diante desse contexto, o objetivo geral deste trabalho é analisar o desempenho da enzima celulósica em diversas condições de dureza, pH e temperatura da água, fornecendo subsídios valiosos para o aprimoramento das técnicas de acabamento têxtil. Para alcançar essa meta abrangente, foram estabelecidos objetivos específicos claros e atingíveis: avaliar o impacto de diferentes níveis de dureza da água (água sem dureza e água dura) na atividade enzimática; analisar a eficiência da enzima em distintas condições de pH (ácido, neutro e alcalino); e determinar a influência de variações de temperatura (ambiente, moderada e elevada) no processo enzimático.

Adicionalmente, o estudo visa quantificar a resistência à tração do tecido após o tratamento sob cada uma dessas condições, utilizando métodos padronizados.

A relevância deste tema é notável e se estende por diversas esferas, incluindo a área de conhecimento, a sociedade e a atuação profissional. No âmbito acadêmico, esta pesquisa contribui para aprofundar a compreensão da cinética enzimática em matrizes industriais complexas, especificamente no processamento têxtil, preenchendo lacunas de conhecimento sobre a otimização de processos biotecnológicos. Para a indústria, os resultados são de suma importância, pois permitem a otimização dos processos de lavagem de denim, resultando em melhor qualidade do produto final, redução de custos operacionais por meio de uma utilização mais eficiente da enzima e diminuição da dependência de produtos químicos agressivos. Social e ambientalmente, ao identificar as condições ideais para a atividade enzimática, este estudo fomenta o desenvolvimento de práticas de acabamento têxtil mais ecológicas, minimizando a poluição da água e o consumo de energia, e promovendo uma indústria mais sustentável e responsável.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 O QUE É O ALGODÃO?

O algodão é uma fibra natural extraída das sementes da planta do gênero *Gossypium*. Sua fibra branca ou esbranquiçada é utilizada há mais de 4000 anos, sendo mencionada em textos indianos como o Código de Manu (AMPA, 2017 apud Robles,2017). O nome "algodão" tem origem na palavra árabe *al-guṭum*, refletindo a influência dos árabes na disseminação da cultura para a Europa. Atualmente, estima-se que cerca de 60% da fibra de algodão mundial seja utilizada na fabricação de roupas e produtos têxteis. A Figura 1 representa um campo de algodão.

Figura 1 - Campo de Algodão



Fonte: Unsplash (2025)

#### 2.1.1 O DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAÇÕES DE ALGODÃO NO BRASIL E NO MUNDO.

Antes mesmo da colonização, os povos indígenas brasileiros cultivavam, fiavam e teciam o algodão para confeccionar redes e cobertores. No período colonial, o cultivo comercial do algodão se consolidou, principalmente na região Nordeste, com o Maranhão sendo o maior produtor no século XVIII. Em 1760, o Brasil exportou as primeiras sacas de algodão para a Europa (AMPA, 2017 apud Robles,2017).

Nos Estados Unidos, o algodão se tornou uma commodity de grande valor após a invenção do descaroçador por Eli Whitney em 1792, impulsionando a industrialização e transformando o país no maior produtor mundial. No Brasil, a cultura

algodoeira passou por profundas transformações, especialmente a partir da década de 1980, quando a produção foi severamente afetada pela praga bicudo-do-algodoeiro. Entre 1986 e 1990, a desregulamentação do mercado, a eliminação de tarifas alfandegárias e fatores econômicos adversos agravaram a crise do setor (Alves, 2006; Barchet, Rocha e Dal Pai, 2016 apud Alcantara, 2021).

Segundo Alcantara (2021), com a adoção de novas tecnologias e técnicas agrícolas, o setor algodoeiro brasileiro se fortaleceu partir do final dos anos 1990, o Mato Grosso emergiu como o principal produtor nacional, substituindo o Nordeste. A demanda global por fibras naturais também impulsionou a recuperação da produção, beneficiando indústrias têxteis e outros setores.

### **2.1.2 A PRODUÇÃO DE ALGODÃO NO BRASIL E NO MUNDO ATUALMENTE.**

O algodão desempenha um papel crucial no agronegócio brasileiro, sendo essencial tanto para o mercado interno quanto para as exportações. Em 2019, o Brasil produziu cerca de 6,9 milhões de toneladas de algodão, consolidando-se como o quarto maior produtor mundial, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos. As exportações de algodão em pluma geraram receitas de R\$ 10,6 bilhões nesse ano, enquanto o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio da cadeia algodoeira foi estimado em R\$ 16,1 bilhões em 2017, segundo o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea, 2020 apud Alcantara 2021).

Segundo Alcantara (2021), a produção brasileira tem sido considerada promissora pela Associação Brasileira dos Produtores de Algodão (Abrapa), sendo um dos principais consumidores dessa fibra no mercado global. Atualmente, com investimentos constantes em inovação e sustentabilidade, a cadeia produtiva do algodão segue em crescimento, desempenhando um papel relevante no desenvolvimento econômico e industrial do Brasil.

### 2.1.3 ASCENSÃO DO ALGODÃO E ESTAGNAÇÃO AÇUCAREIRA.

Com a intensificação da concorrência internacional, o preço do açúcar brasileiro sofreu uma queda significativa. Esse cenário foi agravado por fatores como o uso de técnicas agrícolas precárias, a ocorrência de pragas e enfermidades que afetavam os trabalhadores escravizados. Embora a produção açucareira tenha se mantido estável em algumas regiões, como o Norte do país, os lucros foram substancialmente reduzidos. Em contraste, a cultura do algodão passou a se destacar economicamente, alcançando níveis de produção voltados para a exportação, uma vez que, diferentemente do setor açucareiro, não existia um sistema escravista consolidado nas regiões produtoras globais (Lacerda, 2010, apud Oliveira 2021).

Em meados do século XVIII, o governador de Pernambuco, Luiz Diogo da Silva, reconheceu a aptidão do solo local para a cultura do algodão. Com o intuito de diversificar a produção agrícola e diminuir a dependência econômica do açúcar, ele propôs uma medida legal que obrigava os senhores de engenho a cultivarem, no mínimo, duas arrobas de algodão anualmente (Ribeiro Jr., 1981, apud Oliveira 2021).

Durante os séculos XVIII e XIX, foram elaborados diversos manuais dedicados ao cultivo do algodão no Brasil. Em uma dessas obras, José de Sá Bitencourt destacou, em sua *Memória sobre as plantações do algodão*, as vantagens das áreas do interior da Bahia para essa cultura, argumentando que as regiões mais distantes do litoral apresentavam melhor produtividade em razão das condições de solo e clima (Bitencourt, 1798, apud Oliveira 2021).

Segundo Bitencourt (1978, apud Oliveira, 2021), sugeria que o cultivo do algodão na região da caatinga fosse realizado entre os meses de julho e setembro, indicando ainda a possibilidade de consorciá-lo com outras culturas, como milho e feijão. Além disso, ele chamava a atenção para a insegurança nas estradas, fator que dificultava o escoamento da produção agrícola.

Na obra *A memória sobre a cultura dos algodoeiros*, Manuel Arruda Câmara fez uma análise abrangente sobre o cultivo do algodão no Brasil, tratando desde as etapas de plantio até suas aplicações na indústria e na medicina. Ele também alertava para o risco de pragas, como a lagarta do algodão, que causava sérios prejuízos durante períodos de chuvas intensas, ressaltando que o clima seco do Nordeste

brasileiro era um fator que inibia a proliferação desse inseto (CAMARA, 1799 apud Oliveira, 2021).

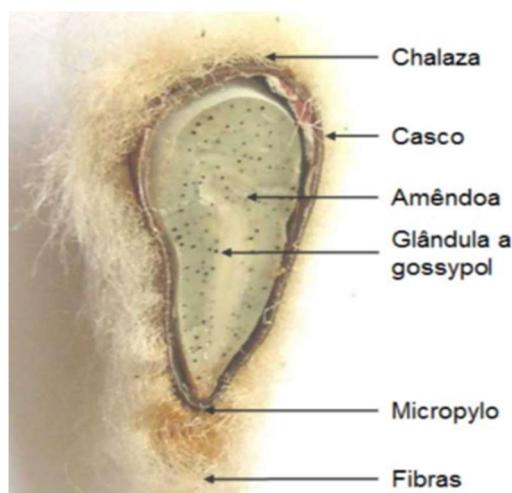
Segundo Câmara (1799 apud Oliveira, 2021) a colheita do algodão era realizada após o período das chuvas, porém as variações climáticas podiam afetar negativamente a qualidade da fibra. Para preservar o produto, era fundamental garantir sua secagem adequada antes do armazenamento. Dentre os desafios enfrentados, estavam as pragas, como os ratos, o que levava os agricultores a adotarem medidas de proteção. O processo de beneficiamento incluía o descaroçamento, etapa em que as sementes eram separadas das fibras, inicialmente por meios manuais e, posteriormente, com o uso de máquinas provenientes da Índia.

Nos Estados Unidos, a invenção da máquina *Botton Gin* por Eli Whitney, em 1792, representou um marco para a produção algodoeira, promovendo um avanço significativo na economia do sul do país, fortemente apoiada na mão de obra escrava. No Brasil, entretanto, esse processo de modernização ocorreu de forma mais lenta. Até o século XIX, predominavam os métodos manuais, embora algumas máquinas, como a caiena — utilizada na capitania do Maranhão — tenham sido introduzidas, apesar de exigirem esforço físico intenso (Ribeiro Jr., 1981 apud Oliveira, 2021).

Diante da crescente valorização do algodão no cenário internacional, foram desenvolvidas diversas iniciativas voltadas à melhoria da sua produção no Brasil. (Arruda, 1945 apud Oliveira, 2021).

#### 2.1.4 O QUE SÃO FIBRAS DE ALGODÃO, COMO SE FORMAM E CRESCEM.

Figura 2 - Corte longitudinal de um caroço de algodoeiro *Gossypium hirsutum* L.



Fonte: B. Bachelier © Cirad

O algodão (Figura 2) se desenvolve a partir de uma estrutura chamada capulho, também denominada cápsula, que abriga sementes cercadas por longos filamentos. Conforme a planta se desenvolve, essas fibras vão se agrupando no interior do capulho. Quando este atinge a maturidade, ocorre sua abertura, revelando o algodão como uma massa fofa composta por fibras de alta qualidade. Cada fibra do algodão corresponde a um filamento individual que se origina da célula epidérmica da semente, apresentando estrutura monocelular. Em média, cada semente de algodão pode originar mais de 20 mil dessas fibras, sendo que um único capulho maduro pode conter mais de 150 mil. O capulho se forma após a queda da flor do algodoeiro, crescendo ao longo de aproximadamente sete semanas até se abrir e liberar as fibras, que se expandem e secam, adquirindo um aspecto leve e macio (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

A formação da celulose ocorre de maneira irregular, caracterizada por fibras dispostas em espiral, podendo conter mil ou mais fibrilas em torno de cada anel. Esse processo de deposição prossegue por um período de 24 a 35 dias, até que cada fibra amadureça e contenha em sua estrutura milhares de microfibrilas de celulose organizadas em uma disposição espiralada. Essa camada, conhecida como parede secundária, representa a porção principal da fibra (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

De acordo com Nunes; Silva e Nunes Filho, (1999), o diâmetro da fibra de algodão é influenciado por fatores genéticos, enquanto as características da fibra são determinadas pelas condições de crescimento. A qualidade da fibra está diretamente relacionada às condições ambientais que ela enfrenta durante o seu desenvolvimento no capulho. Pesquisas demonstram que fibras de algodão cultivadas sob luz artificial e temperatura constante não apresentam anéis concêntricos e apresentam menor resistência à tração. Por outro lado, quando o cultivo ocorre sob luz artificial, mas com ciclos de iluminação que simulam o dia e a noite, as fibras desenvolvem anéis similares aos observados em condições naturais (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

Qualquer adversidade ocorrida durante o desenvolvimento da fibra de algodão pode retardar a deposição de celulose. Quando as condições favoráveis são restabelecidas, o crescimento da fibra é retomado, contudo, os efeitos das interrupções ficam evidentes na qualidade final do algodão. Fibras mais curtas tendem a surgir devido a um desenvolvimento deficiente na fase inicial, enquanto fibras de

diâmetro reduzido resultam da interrupção ou lentidão no crescimento da parede secundária (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

Independentemente das condições de cultivo, é inevitável que muitas fibras dentro de cada capulho apresentem um estágio de imaturidade. A proporção entre fibras maduras e imaturas é um elemento crucial para determinar a qualidade do algodão. No algodão comercial, cerca de um quarto das fibras tende a ser imaturo. Em casos excepcionais, a maturidade pode chegar a 90%, mas essa alta proporção é incomum. Na maioria dos casos, o algodão comercial apresenta mais de 84% de fibras maduras, sendo considerado um algodão "muito encorpado". Em média, a taxa de maturidade é de aproximadamente 76%, e valores abaixo desse índice indicam um algodão imaturo, também denominado "pouco encorpado" ou "fraco" (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999). A composição do algodão conforme a tabela 1 é a seguinte:

Tabela 1 - Composição do algodão

Celulose	85,5%
Óleos e ceras	0,5%
Proteínas, pectoses e matéria corante	5,0%
Minerais	1,0%
Água	8,0%

Fonte: Nunes; Silva; Nunes Filho, (1999).

O algodão é formado essencialmente por celulose, apresentando apenas pequenas quantidades de impurezas como ceras naturais, pectina, pigmentos e compostos nitrogenados. Tais substâncias são eliminadas por meio de processos de lavagem e branqueamento, realizados antes das etapas de tingimento e acabamento. A fibra, composta por celulose de fórmula química  $C_{10}H_6O_5$ , mantém suas propriedades praticamente inalteradas quando as operações de limpeza são corretamente executadas, evitando assim sua degradação (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

A celulose presente nas fibras de algodão é composta por longas cadeias moleculares ligadas por grupos hidroxila (OH). Essas cadeias se organizam paralelamente em forma de espiral ao longo da fibra, o que garante ao algodão elevada resistência à tração e estabilidade dimensional. A abundância de grupos OH

também proporciona uma alta capacidade de absorção de água — podendo reter até 50% de seu peso — além de favorecer o processo de tingimento em soluções aquosas (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

### **2.1.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DO ALGODÃO.**

Diversos fatores influenciam diretamente a qualidade e a produtividade da fibra de algodão. Cada variedade agrônômica possui características próprias, embora uma parcela das fibras possa apresentar traços indefinidos ou variáveis. No que se refere ao solo, elementos como textura, estrutura e adubação exercem grande influência no cultivo; solos férteis tendem a gerar fibras superiores em comparação com aqueles pobres em nutrientes, sendo o potássio especialmente importante para a qualidade final da fibra. A disponibilidade de água e o uso adequado da irrigação também são fundamentais para alcançar alta produtividade e preservar as características típicas de cada variedade. Além disso, o controle eficaz de pragas e doenças é crucial, já que a presença desses agentes pode comprometer de forma significativa tanto o rendimento quanto a qualidade do algodão (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

### **2.1.6 CULTURAIS MÉTODOS DE CULTIVO**

Solo, área cultivada, épocas de sol ou chuva, distância entre as plantas, modo de preparo do solo, técnicas utilizadas, etc., constituem fatores importantes na qualidade das fibras e produtividade do algodoeiro. Colheita – de suma importância na qualidade do algodão, principalmente no que se refere à maturidade da fibra e nas impurezas nela contida. Da colheita poderá depender a alta ou baixa classificação do algodão (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

### **2.1.7 CLIMÁTICAS CHUVAS**

Decisiva para a cultura, principalmente nas áreas onde não existe irrigação. Uma insuficiente quantidade de água causa baixa produção e percentagem de fibras. Uma grande quantidade no período de abertura dos casulos resulta em fibra manchada com baixa classificação. Temperatura – variações bruscas provocam abertura ou queda dos casulos pequenos. Baixas temperaturas impedem o amadurecimento normal e o crescimento uniforme da fibra, podendo afetar suas

propriedades características. Ventos – pode diminuir a produção total por unidade de área. Pode principalmente revolver a cultura, originando casulos e fibras sem caráter firme, apresentando cor cinzenta que desclassifica o algodão (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

### **2.1.8 MECÂNICAS**

A utilização de máquinas inadequadas para colher o algodão pode provocar a desclassificação da fibra, visto levar com o algodão galhos, folhas, areia e outros materiais impróprios à pureza do material colhido, sendo o melhor método colher algodão à mão" (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

### **2.1.9 CLASSIFICAÇÃO DO ALGODÃO.**

"Para avaliar a qualidade de um algodão se devem ter em conta as seguintes características:

- comprimento da fibra
- a finura
- a maturação
- a resistência
- as impurezas

Na avaliação da qualidade do algodão destinado à produção de fios, é comum considerar aspectos como o grau, o comprimento e o caráter da fibra. Essa classificação é realizada por especialistas, com base em critérios técnicos e padrões definidos por meio de análises laboratoriais. Entre os parâmetros avaliados estão: comprimento das fibras, diagrama de distribuição, finura (micronaire), rigidez, alongamento, elasticidade, forma, capacidade de absorção de umidade (higroscopicidade), brilho, resiliência, resistência à tração (tenacidade), densidade e inflamabilidade, entre outros (NUNES; SILVA; NUNES FILHO, 1999).

Grau é determinado pela cor, tipo e matéria estranha presente na fibra e pelo nível de maciez com que ele foi descaroçado.

- A cor normal é branco-creme, variando conforme a cultura, colheita e armazenamento, é determinada em função do tom, se o algodão possui a cor própria da variedade;

- Brilho, se é brilhante ou opaco, comparado com a escala de cores;
- Manchas, identifica a quantidade de manchas presentes na fibra, sem discriminar a origem;

A fibra é avaliada conforme a coloração, sendo atribuídas as seguintes categorias:

- *Gray* (cinza)
- *Extra White* (branco extra)
- *White* (branco) – também conhecido como algodão normal
- *Spotted* (manchado)
- *Tinged* (com cor)
- *Yellow stained* (com manchas amarelas)

Essa variação de cores reflete tanto a aparência visual quanto a presença de impurezas ou degradação por fatores ambientais.

#### **2.1.10 Classificação por Qualidade Física (Preparação)**

Com base na quantidade de defeitos na preparação da fibra, o algodão pode ser classificado em diferentes graus de qualidade:

- *Smooth* (suave) – representa a melhor qualidade disponível
- Normal (normal) – qualidade padrão ou comum
- *Rough* (áspera) – causa a perda de um grau na classificação
- *Very rough* (muito áspera) – resulta na perda de dois graus

#### **2.1.11 Corte da Fibra (*Gin Cut*)**

Durante o descaroçamento com serras, pode ocorrer o corte da fibra, o que compromete sua qualidade. Essa condição é avaliada em diferentes níveis:

- *Gin cut* (fibra cortada) – pode desclassificar a fibra em até dois graus, conforme a gravidade do dano
- *More gin cut* (muita fibra cortada) – apresenta maior número de cortes e asperezas
- *Still more gin cut* – exhibe mais defeitos que o nível anterior

- *Even more gin cut* – possui defeitos graves e acentuados, com severo comprometimento da fibra

Matéria Estranha – podem ser grandes (folhas, pecíolos, talos, etc.) ou pequenas (resíduos vegetais da mesma planta ou de plantas diferentes), areia, óleo, sementes, ervas daninhas, etc., que mesmo estando dentro dos padrões internacionais, desclassificam o algodão (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

Caráter é o conjunto de propriedades e características não incluídas no grau e comprimento, como a finura, maturação, resistência, comprimento, uniformidade, aderência, espiralidade, etc. (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

Finura – está relacionada com o maior ou menor diâmetro da fibra, com seu peso (microgramas) e com a maturidade da fibra. A finura é determinada pelo micronaire, aparelho por onde passa uma corrente de ar em uma amostra de 3,24 gramas de algodão, determinando sua resistência a esta passagem de ar. Se passa pouco ar, o algodão é fino, pois existem muitas fibras e pouco espaço livre entre elas.

Quanto à finura, o algodão classifica-se em:

- Extrafinos (*Sea Islans e Sekallaridis*) - com até 16,5 microns de diâmetro.
- Finos (Egípcios e Brasileiros) – têm diâmetro entre 16,5 e 18 microns.
- Grossos (Asiáticos) – diâmetro superior a 20 microns.

A finura é a propriedade que pouco pode ser alterada com o descaroçamento, embalagem, manuseio e condições atmosféricas. As fibras mais finas destinam-se à produção de tecidos de alta qualidade (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

• Maturidade – na determinação da maturidade utiliza-se o sistema Causticaire, onde é avaliada a maturidade ou grossura das paredes da fibra, logo após o teste de finura. Mergulha-se as fibras em hidróxido de sódio, deixa secar, determina-se novamente o novo micronaire, que será a maturidade da fibra e não a finura (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

• Resistência – é a força necessária para se romper a fibra. A resistência é característica de cada variedade de algodão, podendo ser afetada pelas condições climáticas, umidade, desidratação e descaroçamento. A resistência pode ser medida rapidamente pelo rompimento da fibra entre os dedos, mas o aparelho usado

mundialmente para essa determinação é o Pressley, que utiliza peso, pinça, prensa, etc.” (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

- Comprimento – é um fator muito importante na determinação da qualidade da fibra, estando associado à finura e à resistência. As fibras mais longas são mais finas e fortes, e por isso são usadas para a fabricação de tecidos finos e resistentes. O comprimento da fibra é medido sob condições de 65% de umidade relativa e 20° C de temperatura, equivalente a 01 atmosfera e um aparelho fotoelétrico, chamado fibrógrafo. Por ser o fibrógrafo um método relativamente lento, normalmente se utiliza em grande escala comercial o “*Pulling-Staple*”, sistema manual, que é bastante difícil, exigindo grande experiência e habilidade do analisador (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

O comprimento é uma das propriedades que mais sofrem danos com o descaroçamento ou quando é demasiadamente processado. Por esse motivo, é preciso checar a fibra periodicamente durante todo o processo. Não só o comprimento da fibra, mas a sua uniformidade é de suma importância, a qual é avaliada por diagramas e pela percentagem da dispersão do comprimento, em aparelhos próprios.

Quanto mais uniforme for o algodão, melhor utilidade têxtil terá; quanto menos uniforme, maior será o desperdício (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

De um modo geral, as propriedades de caráter se relacionam entre si, do seguinte modo:

- 1 – A finura se associa ao comprimento. O maior comprimento corresponde ao maior grau de finura.

- 2 –” A resistência se associa à espiralidade e ao grau de maturidade da fibra” (Nunes; Silva; Nunes Filho, 1999).

## **2.1.12 CARACTERÍSTICAS DA FIBRA DE ALGODÃO**

**Pesquisa feita no Google (2025)** destaca que a fibra de algodão é uma fibra natural, caracterizada por ser macia, confortável e respirável, além de possuir propriedades hipoalergênicas, hidrófilas e duráveis.

- Suavidade: A Fibra de algodão é macia e confortável ao toque.
- Respirável: O algodão permite a circulação de ar, ajudando a regular a temperatura corporal.
  - Absorção: O algodão é hidrófilo, ou seja, tem uma excelente capacidade de absorção.
  - Hipoalergênico: O algodão tem uma baixa tendência para provocar reações alérgicas.
  - Durável: A fibra de algodão é forte e resistente, o que lhe confere durabilidade ao longo do tempo.
  - Versatilidade: O algodão pode ser facilmente tingido e estampado.

### **2.1.13 BENEFICIAMENTO DO ALGODÃO**

Lucas Henrique de Camargo (2019) explica que o beneficiamento do algodão, realizado nas algodozeiras antes da industrialização, envolve a separação das fibras e das sementes por meio de processos mecânicos. Esses processos são realizados com o objetivo de preservar ao máximo as qualidades da fibra, garantindo que o produto final atenda às exigências das indústrias de fiação, tecelagem e têxtil.

### **2.1.14 PESAGEM, AVALIAÇÃO DE UMIDADE E VARIEDADE**

O processo de beneficiamento inicia-se com a pesagem e avaliação de umidade e impurezas do algodão. Nesta etapa, uma amostra é coletada para verificar o grau de transgenia, além de se realizar a análise do percentual de umidade, já que quanto mais seco o algodão, melhor se preservam as características da fibra. Em seguida, o fardão é registrado e encaminhado para o processamento ou armazenagem (Camargo, Lucas (2019)).

### **2.1.15 DESMANCHE DO FARDÃO, PRÉ-LIMPEZA DO ALGODÃO**

No desmanche do fardão, ocorre a desintegração mecânica em duas modalidades. No primeiro, o algodão é imediatamente lançado na fita transportadora,

enquanto no segundo há uma passagem pelo batedor inclinado, que remove impurezas como terra e folhas. A seguir, o algodão passa pelo processo de pré-limpeza, onde cerca de 70% das impurezas são eliminadas através de um equipamento mecânico. O restante das impurezas é retirado em uma segunda etapa com o uso de um equipamento especializado. (Camargo, Lucas (2019).

### **2.1.16 DESCAROÇAMENTO E LIMPEZA DA PLUMA**

As máquinas de descaroçamento, consideradas o núcleo da usina, têm um papel crucial na separação das fibras e das sementes, utilizando serras, costelas e rolos de escova para garantir que a pluma não seja contaminada pelo óleo das sementes. Após a limpeza, a pluma é separada do ar e passa por um penteador de pluma para a remoção de fibrila, um resíduo resultante do processo. (Camargo, Lucas (2019).

### **2.1.17 ENFARDAMENTO E PRENSAGEM**

A etapa final envolve o enfardamento, onde a pluma é prensada em fardos de aproximadamente 200 kg. Esses fardos são identificados, pesados e têm amostras retiradas para a classificação em laboratórios especializados. Após a liberação do relatório de análise, os fardos são organizados conforme a classificação da pluma e armazenados até a sua comercialização. (Camargo, Lucas (2019).

Figura 3 - Abridor de Fardos



Fonte: Busa Industria, 2019.

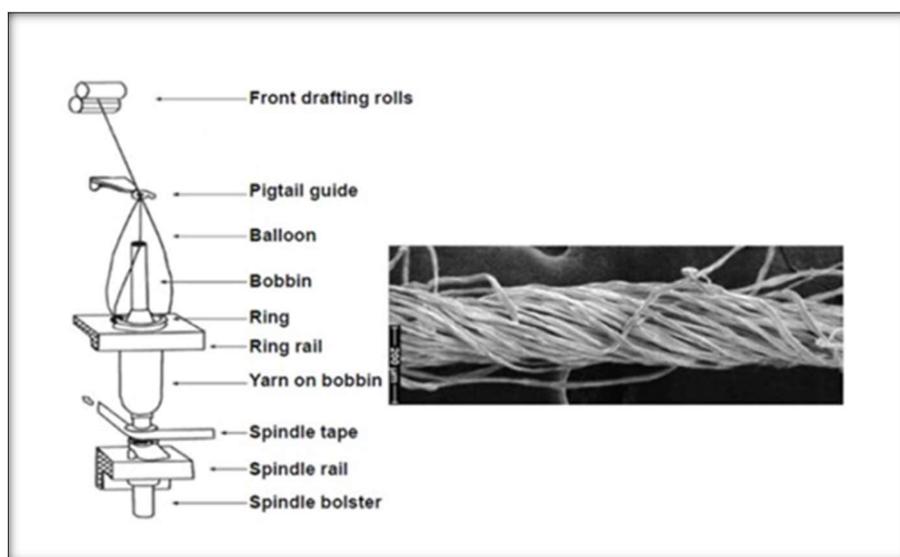
## 2.2 FIAÇÃO

A fiação de algodão é o processo de transformar as fibras de algodão em fios.

### 2.2.1 FIAÇÃO CONVENCIONAL

Fiação convencional (Figura 4) também chamada de fiação a anel é um dos métodos mais antigos utilizados na produção de fios têxteis, nesse método as fibras passam por diversas etapas que garantem a transformação da fibra do algodão em fio uniforme e resistente. O fluxo de produção segue uma sequência estruturada que se inicia com a linha de abertura dos fardos de algodão e posteriormente passa pelas cardas para promover a limpeza dessas fibras, penteagem, estiragem, maçarqueira e finalmente a fiação. (Camargo, Lucas (2019).

Figura 4 - Fio Convencional



Fonte: adaptado de Belot (Bange et al. 2009, p.160)

### 2.2.2 ABERTURA AUTOMÁTICA OU MANUAL

A primeira etapa consiste na abertura (Figura 5) e separação das fibras compactadas em fardos, permitindo melhor aproveitamento da matéria-prima. Esse processo pode ser manual ou automatizado, dependendo do tipo de equipamento que a fábrica possui. (Belot, 2018).

Figura 5 - Abridor e alimentador automático de fardos



Fonte: Adaptado de Belot (Jorge José de Lima, 2018, p. 180)

### 2.2.3 BATEDORES

Os batedores continuam a limpeza das fibras, removendo impurezas vegetais e partículas indesejáveis. Segundo Souza (2011, apud Belot, 2018) “a eliminação de impurezas na fase inicial do processo impacta diretamente a qualidade do fio final.”

### 2.2.4 CARDAS

O processo de cardagem é responsável por continuar a limpeza e a abertura entre as fibras até separá-las quase que individualmente por meio da estiragem, iniciando a orientação para sua paralelização. A cardagem elimina fibras curtas e neps após esse processo ocorre a estiragem, onde forma uma manta de fibras como um véu fino (Figura 6) que posteriormente forma a fita. (Souza,2011 apud Belot, 2018).

Figura 6 - Vêu e Fita produzida pela carda



Fonte: Adaptado de Belot (Jorge José de Lima, 2018, p.181)

### 2.2.5 PASSADORES

Os passadores (Figura 7) garantem a uniformidade do fio, realizando estiragem controlada para reduzir variações de espessura.

Figura 7 - Trem de estiragem, dos passadores



Fonte: Adaptado de Belot (Jorge José de Lima, 2018, p.182)

### 2.2.6 REUNIDEIRAS/PENTEADEIRAS

Penteagem (Figura 8) é essencial para remover fibras curtas e proporcionar maior regularidade ao fio, melhorando sua qualidade final. Conforme estudos da

CSIRO (2009), fibras penteadas se tornam mais selecionadas e longas promovendo maior regularidade e menor nível de imperfeições nos fios.

Figura 8 - Penteadeira, rolos de manta de alimentação e fitas



Fonte: Adaptado de Belot (Jorge José de Lima, 2018, p.182)

### 2.2.7 MAÇAROQUEIRA

Essa fase do processo de fiação transforma a fita de algodão em pavio, preparando-o para a fiação final. Segundo Bange et al. (2009, apud Belot, 2018), a maçarqueira (Figura 9) tem papel fundamental na formação inicial do fio e no controle da torção.

Figura 9 - Maçarqueira alimentada por fitas de passadores e pavios



Fonte: Adaptado de Belot (Jorge José de Lima, 2018, p. 183)

### 2.2.8 FILATÓRIOS

O Filatório (Figura 10) é a máquina responsável por converter o pavio em fio definitivo. No caso da fiação convencional, essa conversão ocorre por meio de torção e estiragem, garantindo um fio (Figura 11) de alta resistência e uniformidade (Hequet, 2013 apud Belot, 2018).

Figura 10 - Pavios transformados em fios e espulas



Fonte: Santanutex máquinas têxteis

### 2.2.9 BOBINADEIRAS/CONICALEIRAS

É a fase de preparação dos fios para a tecelagem em cones ou bobinas. Conforme as Figuras (12, 13 e 14).

Figura 11 - Preparação de fios



Fonte: Santanutex máquinas têxteis

Figura 12 - Conicaleira, fusos e bobinas de fio



Fonte: Santanutex máquinas têxteis

### 2.2.10 RETORCEDEIRAS

O processo de torção adicional melhora a resistência e a estabilidade dos fios em aplicações específicas.

### 2.2.11 DIREÇÃO DA TORÇÃO

O fio pode apresentar duas direções de torção: S e Z a torção S ocorre quando as fibras são torcidas no sentido horário, resultando em uma inclinação para a esquerda ao serem observadas de baixo para cima. Esse padrão se assemelha à parte central da letra "S".

A torção Z, por sua vez, ocorre quando as fibras são torcidas no sentido anti-horário, fazendo com que sua inclinação seja para a direita ao serem observadas de baixo para cima esse formato se assemelha à parte central da letra "Z", conforme demonstrado na ilustração na Figura 13.

Figura 13 - Ilustração: Torções Z e S

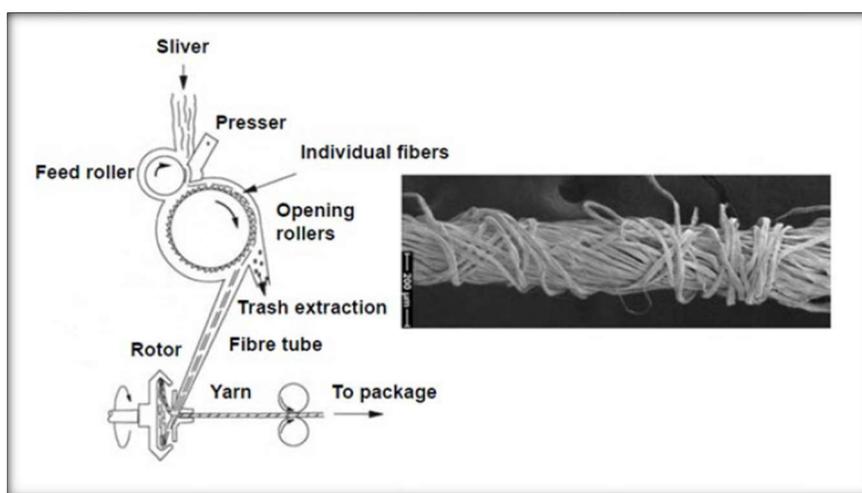


Fonte: Têxtil – Tecnologia de Fiação (2012)

## 2.2.12 FIAÇÃO OPEN END

A **fiação *Open End*** (ou fiação de rotor) é uma técnica mais recente que dispensa o uso de pavios, tornando a produção mais rápida e econômica. Segundo (Hequet, 2013 apud Belot, 2018), esse método é amplamente utilizado para fios grossos e médios. Conforme esquema na Figura 14.

Figura 14 - Esquema de uma fiação de rotor



Fonte: adaptado de Belot (Bange et al., 2009, p. 160)

### 2.2.13 ABERTURA AUTOMÁTICA OU MANUAL

Similar à fiação convencional, a primeira etapa do processo *Open End* envolve a separação das fibras dos fardos para remoção de impurezas.

### 2.2.14 BATEDORES

O batedor da fiação *Open End* tem um papel crucial na limpeza da fibra, uma vez que esse método utiliza fibras mais curtas e propensas a impurezas.

### 2.2.15 CARDAS

A cardagem no sistema *Open End* é essencial para a separação e alinhamento das fibras, garantindo um fio mais homogêneo.

### 2.2.16 PASSADORES

Os passadores na fiação *Open End* garantem a uniformidade da fibra antes da formação do fio.

### 2.2.17 FILATÓRIOS OPEN END (ROTOR)

A principal diferença entre a fiação convencional e a *Open End* está no sistema de filatórios, o método *Open End* as fibras são alimentadas em um rotor de alta velocidade, onde são transformadas em fios (Figura 15) sem a necessidade de pavios intermediários (Bange et al., 2009 apud Belot, 2018).

Figura 15 - Filatório rotor com fitas de alimentação e bobinas de fios



Fonte: Adaptado de Belot (Jorge José de Lima, 2018, p. 184)

### 2.2.18 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

<b>Característica</b>	<b>Fiação Convencional (Anel)</b>	<b>Fiação <i>Open End</i> (Rotor)</b>
Qualidade do Fio	Alta (fios finos)	Média (fios grossos)
Produtividade	Baixa	Alta
Custo Operacional	Alto	Baixo

### 2.2.19 QUALIDADE DA FIBRA, INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E UMIDADE

A resistência e elasticidade do fio dependem diretamente da qualidade da fibra utilizada. Além disso, variações na umidade e temperatura do ambiente de fiação impactam a produtividade e a eficiência do processo. Souza (2011) observou que umidade relativa controlada reduz a taxa de rupturas e melhora a performance dos fios.

### 2.2.20 ERGONOMIA E SEGURANÇA NO TRABALHO EM FIAÇÃO

Os operadores de fiação estão sujeitos a condições de trabalho que exigem esforço repetitivo e exposição a poeiras e ruídos. Carneiro (2007) destaca que “a regulação da carga de trabalho na fiação é essencial para a saúde ocupacional e redução de fadiga.” Melhorias ergonômicas, como ajustes de altura das máquinas e automação de processos, podem reduzir problemas de saúde ocupacional.

### 2.2.21 INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA FIAÇÃO

Com os avanços tecnológicos, a fiação tem adotado sensores inteligentes para controle da qualidade e sistemas automatizados para redução de desperdícios. Novos materiais e processos também contribuem para aumentar a produtividade e reduzir impactos ambientais. Segundo Hequet (2013 apud Belot, 2018), “o desenvolvimento de novos sistemas de controle automatizado tem permitido maior eficiência e precisão na produção de fios.”

## 2.3 HISTÓRIA DO ÍNDIGO

Segundo Amadio (2012), as cores fazem parte de um papel significativo na vida humana, sendo que no passado eram obtidas de fontes naturais, como o anil, a hena e o pau-brasil, essas são algumas das matérias primas mais antigas utilizados pela humanidade para obtenção de cores. O anil destaca-se por sua ampla aplicação no tingimento, devido à sua capacidade de promover um tom azul profundo ao tecido. Inicialmente era muito utilizado em países asiáticos, seu uso expandiu-se para civilizações antigas como as da Mesopotâmia, Egito, Grécia, Roma, Grã-Bretanha, Mesoamérica, Peru, Irã e diversas regiões da África.

A Índia, tornou-se o principal fornecedor de anil para a Europa onde o produto era conhecido por termos como *Indikon* ou *Indicum*, que significam “substância da Índia” e posteriormente, passou a ser chamado *índigo* no dialeto italiano, denominação que foi incorporada ao idioma inglês e a outras línguas (WIKIPÉDIA, *apud* AMADIO, 2012), planta *Indigofera Tinctoria* (Figura 16).

Figura 16 - Planta *Indigofera Tinctoria*



Fonte: *Baumschule-horstmann*, 2025

O pigmento azul chamado índigo era extraído de determinadas plantas, entre as espécies mais utilizadas destacam-se a *Indigofera Arrecta*, *Indigofera Suffruticosa*, *Indigofera Tinctoria* e *Isatis Tinctoria*, encontradas em diversas regiões do mundo, com destaque para a Ásia e a África. Historicamente os altos padrões da sociedade

eram sinalizados através das cores de suas vestimentas, sendo o azul associado ao status social elevado, tornou-se a cor dos faraós, deuses e princesas, que conferia à tonalidade uma simbologia ligada ao poder e à nobreza. A cor diversificou-se no vestuário de diferentes grupos sociais e culturais, como camponeses medievais, tribos africanas e até mesmo nas faixas utilizadas nas múmias egípcias datadas do terceiro milênio antes de Cristo. Enfatiza-se também o azul no vestuário fúnebre de Tutancâmon, conhecido como Faraó Menino, último faraó da 18ª dinastia do Egito, (AMADIO,2012).

Com a Revolução Industrial, o índigo (Figura 17) passou a ser amplamente utilizado na produção de Denim e com isso se popularizou através do jeans, tornando-se um elemento acessível nas mais diversas culturas, faixas etárias e classes sociais (FÓRUM TÊXTIL, *apud* AMADIO, 2012).

### 2.3.1 Corante índigo

Figura 17 - Corante índigo



Fonte: Adobe Stock, 2025

O pigmento índigo natural é extraído das flores da planta *Indigofera Tinctoria*, das quais são imersas em água com glicose e posteriormente submetidas a um processo de fermentação, deixando o banho alcalino, possibilitando a adição de hidróxido de cálcio ou amônia. Em seguida, realiza-se a ventilação com oxigênio, o que permite a separação do pó de índigo, que é insolúvel. As flores secas, por sua vez, são trituradas e também utilizadas na produção de tinturas para cabelo.

Estima-se que, em média 1.000 kg de planta dessecada produz entre 15 a 20 kg de pigmento índigo (ETNOBOTÂNICA, 2023)

De acordo com Yussuf et al. (2017 apud Coelho, 2019) a indigotina é possivelmente o grupo mais relevante entre os corantes naturais, sendo também considerado o mais antigo utilizado pelas civilizações, o índigo natural, caracterizado por sua coloração azul distinta, possui uma longa história de aplicação e é considerado um dos corantes mais importantes e valiosos ao longo da história.

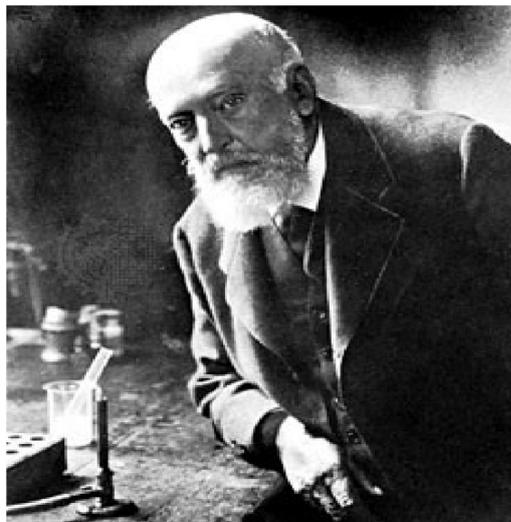
Conforme Sakthivel (2011 apud Coelho, 2019) qualquer tecido com mais de cem anos que apresente tonalidade azul, provavelmente foi tingido com o corante índigo. Ainda segundo UI-Islam (2017 apud Coelho, 2019) o uso do corante índigo remonta à Antiguidade, sendo empregado na pintura por gregos e romanos desde o período de 640 a 320 a.C.

### **2.3.2 Índigo Sintético**

Segundo Amadio (2012), o índigo foi sintetizado no século XIX, pelo químico alemão Johann Friedrich Wilhelm Adolf Von Baeyer, que cursou matemática e física na Universidade de Berlim, antes de se transferir para Heidelberg, onde passou a estudar química com o renomado cientista Robert Bunsen. Iniciou suas pesquisas sobre o índigo em 1865, o que levou à descoberta do indoxil e à síntese parcial do pigmento, em 1878 conseguiu produzir o anil sintético. Após dezessete anos de investigação, em colaboração com Heinrich Caro, obteve a síntese do índigo nos primeiros meses de 1880, o que lhe rendeu a Medalha Davy em 1881. Porém somente em 1883 foi anunciado a estrutura química do índigo.

Iniciou-se em 1897 a comercialização do índigo sintético, tornando-se economicamente mais viável que a extração natural. Devido à importância de suas descobertas na área da química orgânica, Von Baeyer (Figura 18) foi condecorado com o Prêmio Nobel de Química em 1905. Após sua morte, ocorrida em 1917, o avanço da indústria química consolidou a produção sintética, encerrando a produção comercial do índigo natural na Inglaterra em 1932 (AMADIO, 2012).

Figura 18 - Adolf Von Baeyer, 1905



Fonte: Britannica

### 2.3.3 Práticas Tradicionais e o Processo Industrial de Tingimento

O termo "índigo" remete a uma prática milenar relacionada à extração e ao uso do corante para o tingimento têxtil. De acordo com Sakthivel (2011, apud Coelho, 2019) essa atividade era realizada por artesãos na Índia há milhares de anos. O domínio do conhecimento sobre a ciência da utilização do corante e sua extração, bem como a arte e a tecnologia do tingimento, disseminou-se para diversas regiões do mundo. Ainda segundo Sakthivel (2011, apud Coelho, 2019) até o surgimento do índigo sintético, a Índia se consolidou como o maior produtor e exportador mundial de índigo natural.

Segundo Sakthivel (2011, apud Coelho, 2019) também observa que o processo de tingimento com índigo foi desenvolvido de distintas formas em diversas culturas. Na Índia, o método tradicional consistia na fermentação do corante extraído da planta, denominado tingimento à cuba, em que o índigo insolúvel era reduzido a uma forma solúvel. A fermentação permitia a quebra da estrutura do corante, viabilizando sua dissolução em água e sua fixação ao substrato.

Diferentemente de outros corantes, o índigo não forma ligações covalentes com as fibras de algodão, sendo apenas fisicamente impregnado. Conforme Hsu et al. (2018 apud Coelho, 2019) embora o corante apresente alta resistência a detergentes, ele se desprende por abrasão contínua, expondo o núcleo branco do fio e gerando o característico efeito desbotado do jeans. Essa combinação de resistência a agentes

químicos e vulnerabilidade à abrasão confere ao índigo um papel insubstituível no tingimento do denim, tecido-base para a fabricação de calças jeans, sustentando sua popularidade ao longo do tempo.

O índigo é um dos pigmentos mais antigos utilizados pela humanidade, com registros de emprego que remontam a cerca de cinco mil anos. Segundo Welsch (2006, apud Costa *et al*, 2016), seu uso é documentado desde a Idade do Ferro e permanece relevante atualmente, especialmente na coloração de jeans, cuja tonalidade azul característica é conferida por esse corante.

A fórmula molecular do índigo é  $C_{16}H_{10}O_2N_2$ , e o composto é encontrado em espécies vegetais como a *Indigofera anil*. Contudo, a produção atual de índigo é quase inteiramente sintética (WELSCH, 2006, apud Costa, Bruno *et al*, 2016).

A síntese industrial do índigo teve início em 1897 e baseia-se na reação de carboxifenila a 200 °C, em presença de hidróxido de sódio. Este processo gera o ácido indoxil-2-carboxílico, que é rapidamente descarbonizado e oxidado ao ar, formando o corante índigo (Costa, Bruno *et al*, 2016).

#### **2.3.4 Considerações sobre o Processo de Tingimento**

O tingimento de fios de algodão com índigo apresenta particularidades técnicas. A molécula de índigo, pequena e de baixa afinidade pelas fibras celulósicas, requer a redução à forma leuco e a execução de uma sequência de impregnações, prensagens (foulardagens) e oxidações. Cada conjunto dessas operações configura um ciclo de tingimento, cujo número pode variar de quatro a oito ciclos, conforme a intensidade de cor desejada (COSTA, BRUNO *et al.*, 2016).

Entre as fibras mais comuns no tingimento com corante índigo estão os naturais celulósicas e algumas fibras animais, como lã e seda. O algodão (Figura 19) se destaca nesse processo devido à sua baixa afinidade com o corante, o que resulta em uma coloração que atinge apenas a superfície do fio, mantendo o núcleo interno sem tingimento (FÓRUM TÊXTIL, 2007, apud AMADIO, 2012).

Figura 19 - Fio de algodão com tingimento índigo



Fonte: FIGUEIREDO; CAVALCANTE, 2010

### 2.3.5 Características do Tingimento

Conforme descrito por Amadio (2012), o tingimento com índigo exige a conversão do corante para sua forma leuco em meio alcalino, seguida por múltiplas etapas de impregnação, compressão (foulardagem) e exposição ao ar para que a cor seja revelada. Este processo é realizado em diferentes tipos de máquinas:

- Ropedye (corda): o fio permanece submerso entre 12 a 20 segundos e passa por uma oxidação de 80 segundos.
- Slasherdye (multi-caixas) e Loop dye: apresentam imersões de 4 a 15 segundos e oxidação de aproximadamente 45 segundos.

A adoção de oxidação forçada permite reduzir até 75% da extensão de fio exposta ao ar, aumentando a qualidade do tingimento.

### 2.3.6 Formas de Comercialização do Corante Índigo

O corante índigo está disponível em diversas formas no mercado:

- Pó ou grânulos;
- Soluções líquidas a 20% e 30%;

- Soluções pré-reduzidas a 30% e 40%.

Apesar de suas origens ancestrais, o corante índigo mantém sua importância na indústria têxtil moderna, especialmente na fabricação de denim. Os avanços tecnológicos melhoraram o controle de qualidade, otimizaram o uso de recursos e garantiram maior uniformidade nos processos (AMADIO, 2012).

### 2.3.7 Principais fornecedores incluem

- Bann Química (Brasil): Índigo Bann nas concentrações de 20%, 30%, 40% e pré-reduzido 30%;
- Buffalo Color Corporation (EUA): Índigo Nacco em concentrações de 20%, 42% e em pó dispersível;
- Clariant (mercado brasileiro): Índigo Líquido a 30%;
- Bezema (Alemanha): Bezema Índigo AXX granulado;
- Dystar: fornecedora de índigo pré-reduzido, concentrando-se no Índigo Vat 40% Solution (FERREIRA e LIMA, 2001, apud AMADIO, 2012).

### 2.3.8 Índigo Normal e Índigo Pré-Reduzido

A concentração de índigo é analisada tanto em termos de porcentagem quanto e densidade, enquanto o índigo normal requer a preparação de uma "tina mãe" com adição de agentes redutores como soda cáustica e hidrossulfito de sódio, o índigo pré-reduzido é fornecido pronto para uso, em containers pressurizados com nitrogênio, simplificando o processo de tingimento e proporcionando maior uniformidade de cor (FERREIRA e LIMA, 2001, apud AMADIO, 2012).

### 2.3.9 Tipos de Máquinas para Tingimento com Índigo

As tecnologias predominantes para tingimento com índigo são:

- *SlasherDye* (multi-caixas);
- *Loop Dye* (*loop* ou *girotex*);
- *RopeDye* (corda).

Essas máquinas são equipadas com acumuladores que permitem manter o processo contínuo durante trocas de rolos ou em caso de rupturas de fios, evitando a formação de manchas (AMADIO, 2012).

### 2.3.10 Tecnologias de Tingimento

#### *RopeDye* (Corda)

O primeiro sistema de tingimento contínuo com corante índigo foi desenvolvido em 1920 pela *Coocker Machine & Foundry Company* nos Estados Unidos, sendo instalado na Cone Mills, em Greensboro. A construção da máquina levou cerca de seis meses (FERREIRA e LIMA, 2001, apud AMADIO, 2012).

As máquinas *RopeDye* (Figura 20) são capazes de operar com 12 a 48 cabos de fios, cada um contendo entre 300 e 450 fios, dependendo do total de fios de urdume a ser tingido. Durante o processo, os cabos são dispostos paralelamente, passando pela instalação de tingimento para, posteriormente, serem abertos, re-urdidos (*re-beaming*) e engomados.

Em alguns casos, essas máquinas podem ser equipadas com um ou dois vaporizadores, permitindo a realização de tingimentos adicionais utilizando corantes como enxofre, reativo ou indanthren (FERREIRA e LIMA, 2001, apud AMADIO, 2012).

#### 2.3.11 Principais vantagens:

- Alta produtividade.
- Ausência de paradas na troca de artigos.
- Uniformidade de tingimento entre a ourela e o centro do tecido.
- Excelente eficiência de tingimento.
- Alta solidez do tingimento.

#### 2.3.12 Principais desvantagens:

- Elevado custo de investimento inicial.
- Exigência de um espaço físico consideravelmente maior (cerca de 100% mais) em comparação a sistemas multi-caixas.
- Perda de elasticidade dos fios.
- Necessidade de abertura dos cabos após o tingimento.

- Custos adicionais relacionados ao uso de amaciantes para abertura das cordas.
- Grande volume necessário para o banho de tingimento.
- Limitação do título de fio do urdume (geralmente até Ne 20/1).
- Maior necessidade de mão de obra qualificada.

Figura 20 - Máquina de tingimento em corda (*RopeDye*)



Fonte: Made - in – China

### 2.3.13 *Slasher Dye* (Multi-Caixas)

O uso da tecnologia de tingimento em multi-caixas (Figura 21) começou na Europa em 1970. Este sistema se popularizou rapidamente devido à sua operação mais simples em comparação ao sistema de tingimento em cordas (FERREIRA e LIMA, 2001, apud AMADIO, 2012).

Neste método, os rolos de urdume são agrupados em uma gaiola similar à usada na engomadeira. O tingimento ocorre através de múltiplas caixas (geralmente entre quatro e oito, podendo chegar a dez), seguido de engomagem contínua. Dependendo das necessidades do processo, pode-se também integrar vaporizadores auxiliares.

### 2.3.14 Principais vantagens

- Instalação mais compacta (demanda menos espaço físico).
- Possibilidade de tingimento de fios mais finos, adequados para camisaria.
- Produção contínua desde a urdideira até a engomadeira.
- Melhor elasticidade dos fios comparada ao tingimento em corda.
- Redução no volume do banho de tingimento.
- Flexibilidade para troca de artigos e de configurações de produção.
- Investimento inicial inferior ao necessário para máquinas de corda.
- Redução da necessidade de mão de obra.

### 2.3.15 Principais desvantagens

- Possíveis variações de tonalidade entre o centro e as orelas dos tecidos.
- Redução da produtividade nas trocas de partidas.
- Maior risco de formação de estopas durante a operação.
- Incidência de manchas na troca de rolos.

Figura 21 - Máquina de tingimento multi-caixas (Slasher Dye)



Fonte: Autor

### **2.3.16 Loop Dye (Loop ou Girotex)**

Desenvolvida inicialmente em 1973 pelo químico têxtil Lau Chor Sen, em Hong Kong, a tecnologia *Loop Dye* (Figura 22) surgiu da necessidade de reduzir o espaço ocupado pelas máquinas de tingimento. A proposta era inovadora: utilizar apenas uma caixa de tingimento, fazendo com que o urdume passasse quatro vezes pela mesma caixa, com processos de oxidação intermediários. Embora o projeto inicial não tenha obtido sucesso e a patente tenha caducado, em 1980 a Italdenim contratou a Master Macherio para construir a primeira máquina funcional baseada neste conceito (FERREIRA e LIMA, 2001, apud AMADIO, 2012).

### **2.3.17 Principais vantagens**

- Instalação extremamente compacta, demandando menos espaço que os sistemas multi-caixas e de corda.
- Operação contínua desde a urdideira até a engomadeira.
- Melhor elasticidade dos fios se comparado ao tingimento em corda.
- Redução significativa do volume de banho de tingimento necessário.
- Maior flexibilidade para tingir fios de títulos mais finos e artigos variados.
- Menor investimento inicial em comparação aos sistemas tradicionais.

### **2.3.18 Principais desvantagens**

- Possibilidade de variações de tonalidade entre o centro e as bordas do tecido.
- Redução da elasticidade dos fios.
- Queda na produtividade em função das trocas de partidas.
- Tendência à formação de estopas.
- Limitação na obtenção de tonalidades muito escuras.
- Maior incidência de rupturas e de manchas.

Figura 22 - Máquina *Loop dyeing*



Fonte: TEXTILELEARNER, 2025

## 2.4 O QUE É ENGOMAGEM

Segundo Pessanha (1989, apud Ponce,2025), engomar é revestir o fio (fiado Figura 23) ou de filamento com uma película (filme), chamada de goma, que pode ser natural ou sintética.

Figura 23 - Fio sem goma / Fio engomado



Fonte: Adaptado de PESSANHA, D. R. Tecnologia da Engomagem. 1. ed. Rio de Janeiro: SENAI-CETIQT, 1989. (AMERICANA/SP 2010).

### 2.4.1 O QUE É A GOMA

Segundo a empresa Jauense (s.d., apud Ponce, 2025), a goma é uma mistura homogênea, obtida através da combinação de vários materiais químicos, espessa, viscosa, líquida quando aquecida, e após secagem se torna sólida e elástica, como um filme de cola.

### 2.4.2 O OBJETIVO DA ENGOMAGEM.

Segundo Pessanha (1989, apud Ponce,2025), o principal objetivo da engomagem é melhorar as condições do tecimento dos fios de urdume, através dos seguintes itens:

Aumento da resistência à tração – modo de trabalho de um corpo, quando

submetido à ação de uma força que atue no sentido de seu eixo e tenda a alongá-lo;

Aumento da resistência à abrasão – desgaste por fricção, raspagem;

Aumento da resistência às flexões – ato ou efeito de curva-se ou dobrar-se;

Aumento da resistência às inflexões – ato contrário a flexão;

Redução da pilosidade.

### **2.4.3 FUNÇÃO DA GOMA SOBRE O FIO**

Segundo Pessanha (1989, apud Ponce,2025), a função da goma no fio fiado é “colar” as fibras, evitando que as mesmas deslizem no momento que o fio é exigido na tecelagem; com isso evita-se o excesso de rupturas e a formação de “bolinhas”, causada pelo acúmulo de fibrilas, conhecidas como “pelúcia”, que desprendem do fio por causa da abrasão. Já no fio fiado, a função da goma é unir os filamentos, pois possuem tendência de se abrirem, principalmente em fios finos e com baixa torção. Abordaremos apenas a engomagem dos fios fiados singelos, ou seja, com um único cabo.

### **2.4.4 TIPOS DE GOMAS / BASE DA FÓRMULA**

Segundo Pessanha (1989, apud Ponce,2025), os agentes engomantes, também chamados de base da fórmula, é responsável pela criação da película que envolverá o fio engomado, colando as fibras.

Existem no mercado agentes engomantes (produtos) naturais e sintéticas, porém os mais utilizados são os amidos/féculas e amidos/féculas com modificações especiais, destinadas a fios tintos com sulfuroso.

Abaixo citaremos as mais conhecidas no mercado e suas características.

### **2.4.5 FÉCULA OU AMIDOS**

Segundo a empresa Jauense (s.d., apud Ponce, 2025), são de origem vegetal e seu principal composto é a amilose (Figura 24).

Principais vantagens:

- Mais barato com boa aderência e não forma espuma;
- Estável para umidade alta;
- Alta resistência aos álcalis;
- Biodegradável;
- Desengomagem mais fácil e por enzimas.

Principais desvantagens:

- Formação de cascas;
- Depósito nos cilindros;
- Alta viscosidade;
- Não recuperável;
- Alta concentração.

Figura 24 - Amido de milho natural



Fonte: EMPRESA JAUENSE. Manual de Engomagem [s.d.]. Apud Ponce, 2025.

#### 2.4.6 PVA (ÁLCOOL POLIVINÍLICO)

Segundo a empresa Jauense (s.d., apud Ponce, 2025), PVA ( Figura25) é um álcool obtido através da saponificação de acetato de polivinila.

Principais vantagens:

- Melhor rendimento dos teares;
- Compatível com outros produtos;
- Fácil formação do filme elástico;
- Menos dependente da umidade nas salas de teares;
- Recuperável.

Principais desvantagens:

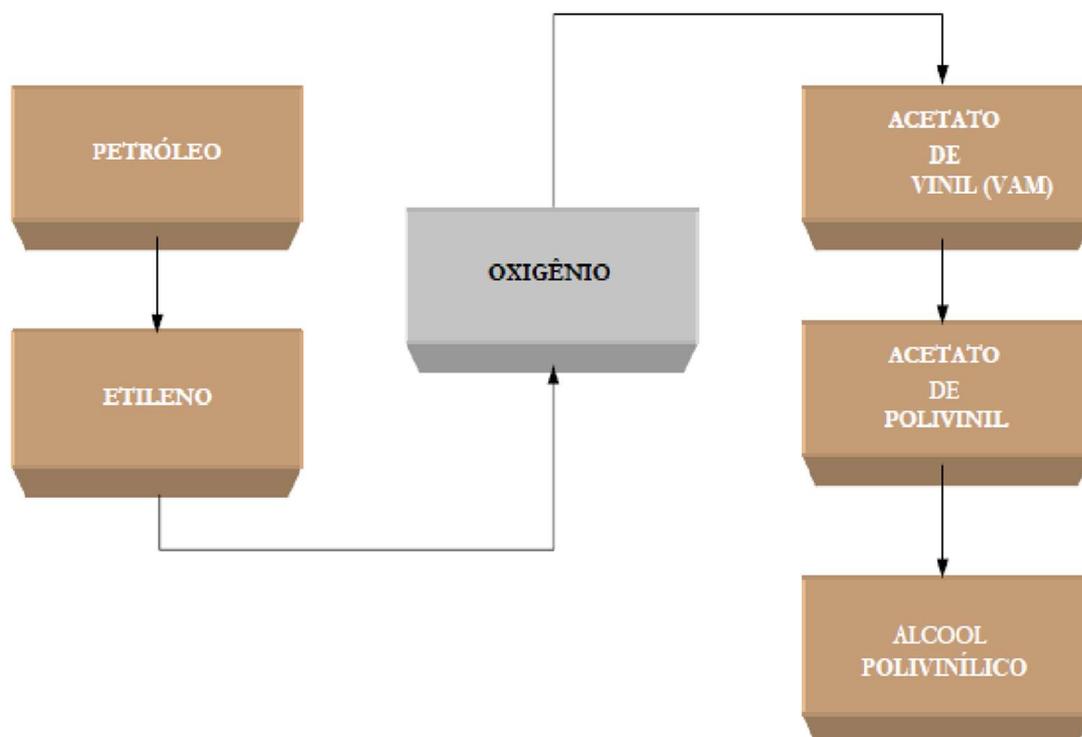
- Sensíveis aos álcalis;
- Sensível ao calor (polimerização na chuscadeira);
- Formação de espuma (PVA com baixa hidrólise < 92%);
- Preço alto;

Figura 25 - PVA



Fonte: EMPRESA JAUENSE. Manual de Engomagem [s.d.]. Apud Ponce, 2025.

Figura 26 - Fluxo de Processo de Fabricação do PVA



Fonte: EMPRESA JAUENSE. Manual de Engomagem [s.d.]. Apud Ponce, 2025.

#### 2.4.7 CMC (CARBOXIMETILCELULOSE)

Segundo a empresa Jauense (s.d., apud Ponce, 2025), são moléculas que possuem maior facilidade de eliminação, obtida a partir da pasta de madeira, com tratamento alcalino e posteriormente com cloreto monocloroacético, que resulta na carboximetilcelulose ( Figura 27).

Principais vantagens:

- Boa formação de película;
- Boa aderência;
- Boa elasticidade;
- Alta resistência aos álcalis;
- Compatível com outros produtos;
- Utilizado em baixa umidade.

Principais desvantagens:

- CMC com sal são corrosivos;
- Formação de aderência (cascas) em alta umidade;
- Preço alto.

Figura 27 - CMC (CARBOXIMETILCELULOSE)



Fonte: EMPRESA JAUENSE. Manual de Engomagem [s.d.]. Apud Ponce, 2025.

#### **2.4.8 PAC (POLIACRILATO)**

Segundo a empresa Jauense (s.d., apud Ponce, 2025), são polímeros resultantes da combinação de propriedades formadoras de películas e o grau de aderência de alguns produtos vinílicos; obtêm-se através sintetização do ácido acrílico, ácido

metacrílico, acrilato de metila, de etila, de butila e acrilonitrila que podem ser polimerizados em condições determinadas.

Principais vantagens:

- Boa solubilidade;
- Força eletrolítica alta;
- Alta resistência aos álcalis;
- Não forma casca ou espuma;

- Estável para a termofixação;
- Recuperável.

Desvantagens:

- Muito higroscópico;
- Baixa viscosidade;
- Não biodegradável;
- Não forma casca ou espuma;
- Estável para a termofixação;
- Recuperável.
- Preço alto.

#### 2.4.9 PAC (POLIACRILATO)

Figura 28 - Poliacrilato

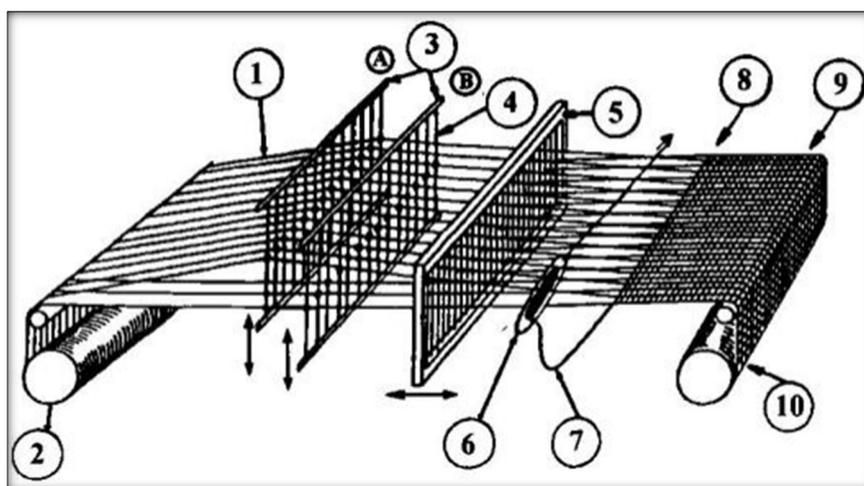


Fonte: EMPRESA JAUENSE. Manual de Engomagem [s.d.]. adaptado de Ponce, 2025

## 2.5 TECELAGEM

Após a engomagem dos rolos, o mesmo é destinado à remeteção. Este processo consiste no passamento dos fios de urdume nas lamelas, liços e pente do tear ( Figura 29). Podendo ser realizada de modo manual, que demanda mais tempo e grande concentração, pois não pode haver erros, e tem o rendimento de até 600 metros/hora, ou de modo automático, quando o rolo de urdume é passado diretamente nos liços, lamelas e pente com velocidade de até 200 metros/minutos. Estando os fios de urdume preparados e remetidos, é iniciado o entrelaçamento com a trama através do tear.

Figura 29 - Mecanismo de funcionamento dos teares



FONTE: Adaptado de Prando (ALCÂNTARA & DALTIM, 1996)

O mecanismo de funcionamento dos teares segue o seguinte procedimento:

Segundo Sidinéia Maria Prando (apud ALCÂNTARA & DALTIM, 1996), os fios de urdume (1) saem do rolo de urdume (2) e passam pelas agulhas (4) dos quadros de liços (3). No caso de tecidos simples, os fios são intercalados através destes quadros de liços (A) e (B). O abaixar e levantar alternados destes quadros de liços faz com que se abra, entre as duas camadas de fios, um espaço chamado de cala, por onde é inserido o fio de trama (7) através de uma lançadeira (6) ou outro sistema. Logo após a passagem do fio de trama, o pente (5) se desloca fortemente para a direita, batendo os fios de trama de forma a aproximar este último fio dos anteriores (8). Este processo se repete a velocidades que podem chegar a 100 batidas por minuto, produzindo o tecido (9) que é enrolado no rolo de tecido (10).

Os teares podem se diferenciar de acordo com o mecanismo de inserção de trama e pelo sistema de abertura de cala. Dentre os principais tipos de teares

temos:

- Lançadeira;
- Lançadeira de pinça;
- Projétil;
- Jato de ar;
- Jato de água.

A maneira que se dá o entrelaçamento dos fios de urdume com os fios de trama é o que determina a estrutura do tecido (também chamada de ligamento). Entre as diversas formas podemos destacar dois tipos de entrelaçamentos mais comuns: tela ou tafetá (Figura 30) e sarja (Figura 31). Estas duas estruturas são distinguidas pela frequência de entrelaçamento e pelo grau de endireitamento dos fios.

Figura 30 - Tela ou tafetá

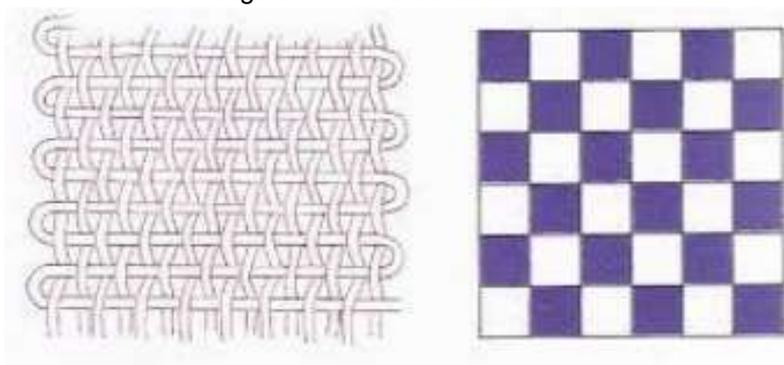
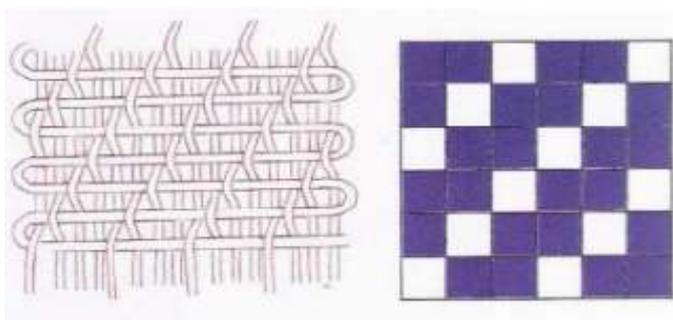


Figura 31 - Sarja



Fonte: Adaptado de Prando (Pezzolo, 2007)

### 2.5.1 TECELAGEM DE DENIM

Segundo Sidinéia Maria Prando (apud ALCÂNTARA & DALTIM, 1996), o tecido denim é caracterizado pelo entrelaçamento de fios de urdume, tintos com corantes índigo - Azul ou enxofres – Black, com os fios de trama brancos. A padronagem utilizada na produção de tecidos índigo pode variar bastante, porém sempre revelando os fios tintos(urdume) Conforme Figura32.

Figura 32 - Detalhes do Denim stonado



Fonte: Autor

O uso de diferentes títulos de fios, densidades de fios, são características fundamentais para a determinação da gramatura do tecido, resistência a tração, rasgo e outra propriedades do tecido.

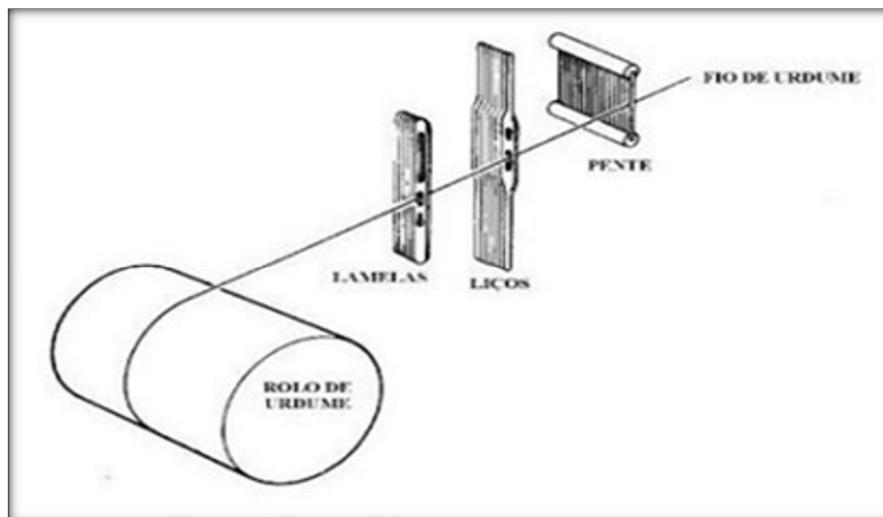
Os principais movimentos realizados pelos teares na produção de índigo são:

- Abertura de Cala: abertura triangular de duas camadas de fios de urdume com auxílio de alavancas e cordéis amarrados aos quadros de liços onde os fios estão inseridos;

- Incurção de trama: introdução dos fios de trama por meio de lançadeira, pinças, projétil, jato de ar ou jato de água.

- Batida de pente: o pente está preso à frente e tem movimento de vai e veem. Quando ele vem à frente, encosta a última trama inserida no remate e quando recua propicia a inserção da trama seguinte. Este movimento é feito em sincronismo com o enrolamento do tecido pronto conforme a sequência na figura 33.

Figura 33 - Caminho dos fios de urdume no tear



Fonte: Adaptado de Prando (Site <http://www.ebah.com.br>)

- Rolo de urdume;
- Lamelas;
- Liços (pertencente aos quadros);
- Pente;

As lamelas (Figura 34) são um dispositivo de segurança, pois promovem a parada do tear quando um fio de urdume se rompe (Figura 36).

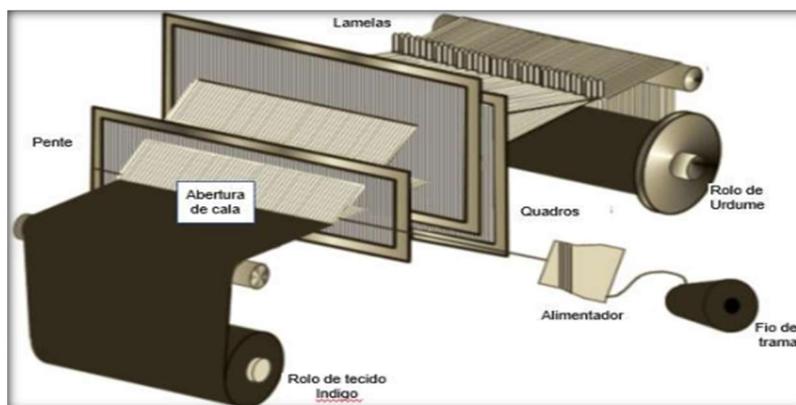
Figura 34 - Lamelas do guarda urdume



Fonte: Adaptado de Prando (Site <http://www.ebah.com.br>)

A figura 35 apresenta um esquema geral de funcionamento do tear que produz o tecido índigo. Na figura estão destacados os principais dispositivos do tear.

Figura 35 - principais dispositivos do tear

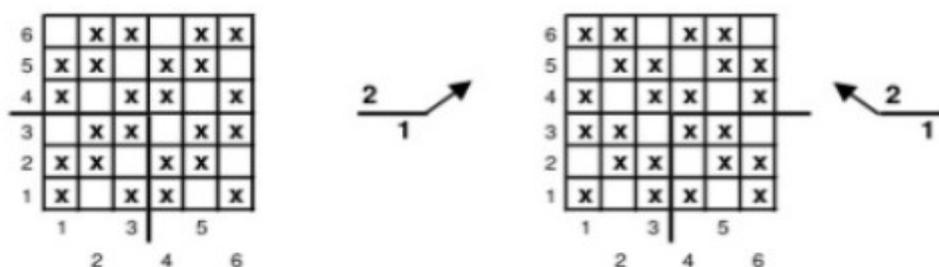


FONTE: Adaptado de Prando (Technical Bulltin – Denim fabric manufacturing, 2004)

## 2.5.2 LIGAMENTO SARJA

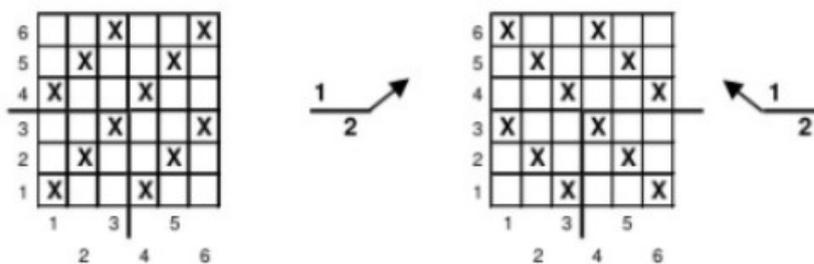
Segundo Sidinéia Maria Prando (apud ALCÂNTARA & DALTIM, 1996), O principal ligamento para a construção do tecido Índigo é a “SARJA”. Este ligamento se caracteriza por apresentar nervuras obliquas, formadas pelo entrelaçamento dos fios de trama e urdume. As nervuras podem se desenvolver para a direita ou para a esquerda. A sarja de menor repetição é aquela formada por três fios de urdume e três fios de trama (sarja de três). O deslocamento utilizado para a formação do tecido é sempre igual a “1”, formando um ângulo de 45°. A sarja apresenta duas formações distintas, uma com efeito de urdume (armação pesada – Figura 36) e outra com efeito de trama (armação leve – Figura 37).

Figura 36 - Armação pesada



Fonte: Adaptado de Prando (FUZIWARA, 2014)

Figura 37 - Armação leve



Fonte: Adaptado de Prando (FUZIWARA, 2014)

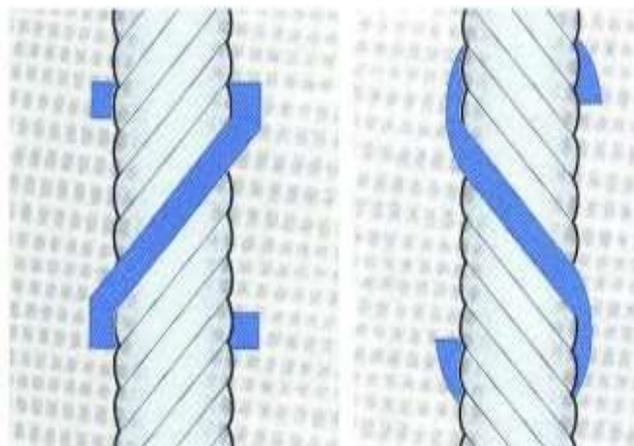
Diagonal é o sentido que deve tomar a nervura formada pelo ligamento. Portanto: diagonal direita, nervura no sentido da direita; diagonal esquerda nervura no sentido da esquerda.

O ligamento sarja geralmente é indicado com um traço horizontal, tendo em uma de suas extremidades o sentido da diagonal. Os números que aparecem no traço horizontal indicam a quantidade de quadros e o número de subida dos quadros.

Quando o número sobre o traço for menor que o de baixo, a sarja será considerada leve; caso contrário, pesada. Geralmente, a sarja apresenta duas faces distintas: uma em efeito de urdume, armação pesada; outra em efeito de trama, armação leve. Nestes ligamentos, a torção do fio exerce forte influência no aspecto do tecido, podendo realçar ou atenuar as diagonais.

Observações práticas demonstram que para destacar o aspecto da sarja, a direção da torção deve ser contrária a direção das diagonais, caso contrário, as nervuras se apresentarão mais apagadas. É indispensável ao técnico de tecelagem, o conhecimento desses sistemas de torção (Figura 39), pois só assim poderá fazer a aplicação do fio corretamente.

Figura 38 - Sistemas de torção



Fonte: Adaptado de Prando (Site <http://www.audaces.com>)

A figura 41 mostra-nos o melhor sentido de diagonal a ser utilizado.

Figura 39 - Sentido de diagonal

FIO	TORÇÃO	CONSTRUÇÃO	SENTIDO DIAGONAL	EXEMPLO	
S I N G E L O		LEVE	DIREITA		
		PESADA	ESQUERDA		
		EQUILIBRADA	ESQUERDA		
R E T O R C I D O		LEVE	ESQUERDA		
		PESADA	DIREITA		
		EQUILIBRADA	DIREITA		

Fonte: Adaptado de Prando (FUZIWARA, 2014)

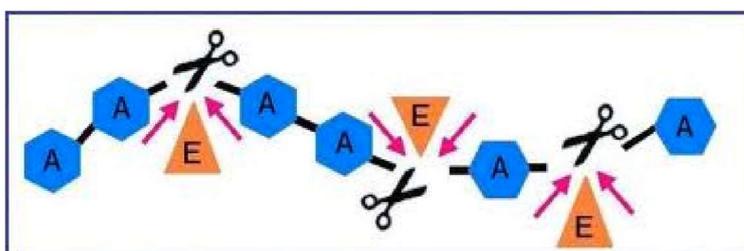
## 2.6 DESENGOMAGEM

Segundo Zille, Andrea (2011) a produção de tecidos de algodão ou de composições mistas, os fios de urdidura recebem um revestimento de substâncias adesivas à base de amido. Esse tratamento tem como objetivo proteger os fios contra o desgaste provocado pelo processo de tecelagem.

Após a etapa de tecelagem, é necessário remover o amido e os componentes não naturais da celulose presentes no algodão. Esse processo, conhecido como desengomagem, prepara o tecido para as próximas fases de tingimento e acabamento, garantindo melhor qualidade e uniformidade na coloração (Zille, Andrea 2011).

Baseado nos estudos de Zille, Andrea (2011) a desengomagem é geralmente realizada com agentes ácidos, alcalinos ou de oxidação a altas temperaturas, o que pode causar imperfeições no tingimento e degradação das fibras de algodão. A amilase, devido à sua alta eficiência e especificidade, consegue remover completamente o amido sem qualquer efeito nocivo sobre o tecido e sem poluição secundária. As  $\alpha$ -amilases promovem a hidrólise de forma aleatória dentro da molécula de amido, resultando na formação de dextrinas solúveis, que vão se tornando progressivamente menores ao longo do processo conforme a Figura 40.

Figura 40 - Dextrina solúvel

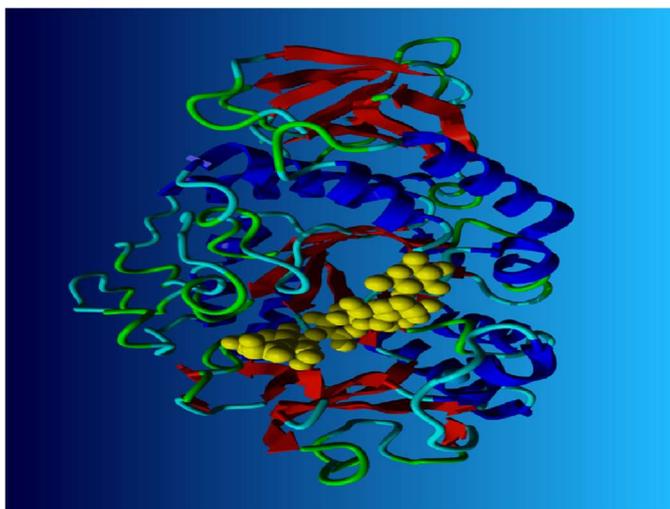


Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

- A  $\alpha$ -amilase fúngica é uma enzima multifuncional, capaz de degradar não apenas amido, mas também moléculas de gordura e proteínas.

- As amilases mais amplamente utilizadas na indústria são originadas de fungos filamentosos e bactérias.
- A amilase convencional pode ser empregada em faixas de pH entre 5,5 e 7,0, operando em temperaturas que variam de 25°C a 55°C.
- As amilases (Figura 41) de alta temperatura são aptas para aplicação em condições superiores a 95°C, incluindo processos pad-steam (Zille, Andrea 2011).

Figura 41 - Amilase



Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

### 2.6.1 Desengomagem enzimática

A remoção da goma no processo convencional pode ser realizada por meio de hidrólise ácida, utilizando ácido sulfúrico ou clorídrico. Além disso, também é possível aplicar agentes oxidantes, como persulfato de amônio ou de potássio, bem como recorrer ao uso de peróxido de hidrogênio (FURLAN, 2012 apud MARROQUES 2020).

Nesse processo, a desengomagem e o alvejamento ocorrem simultaneamente, uma vez que o peróxido de hidrogênio atua como componente essencial em ambas as fases. Todo o procedimento é realizado em um meio alcalino e sob temperaturas elevadas, próximas a 100°C (CARMO et al., 2012 apud MARROQUES 2020).

No processo enzimático, a amilase é a enzima utilizada, podendo ser classificada de acordo com sua origem, pancreática, de malte ou bacteriana, ou conforme seu mecanismo de degradação. As  $\alpha$ -amilases atuam na hidrólise aleatória

dentro da molécula de amido, resultando na formação de maltose e glicose, sendo conhecidas como endoamilases. Já as  $\beta$ -amilases promovem a hidrólise nas extremidades não redutoras do substrato, gerando unidades de maltose, caracterizando-se como exoamilases. Por fim, as glucoamilases, também chamadas de amiloglicosidases, liberam glicose a partir do terminal não redutor da molécula do substrato (REED, 1975 apud MARROQUES 2020). No processo enzimático, a amilase é a enzima utilizada, podendo ser classificada de acordo com sua origem, pancreática, de malte ou bacteriana, ou conforme seu mecanismo de degradação. As  $\alpha$ -amilases atuam na hidrólise aleatória dentro da molécula de amido, resultando na formação de maltose e glicose, sendo conhecidas como endoamilases. Já as  $\beta$ -amilases promovem a hidrólise nas extremidades não redutoras do substrato, gerando unidades de maltose, caracterizando-se como exoamilases. Por fim, as glucoamilases, também chamadas de amiloglicosidases, liberam glicose a partir do terminal não redutor da molécula do substrato (REED, 1975 apud MARROQUES 2020).

Estudos conduzidos em 2012 indicam que a aplicação de sal ou ondas ultrassônicas na desengomagem enzimática potencializa a eficiência das enzimas, pois esses elementos atuam como estabilizadores. Esse efeito contribui para a redução da dosagem necessária da enzima, possibilitando sua utilização em condições de processo mais moderadas (CHAND et al., 2012; WANG et al., 2012 apud MARROQUES 2020).

A amilase de origem bacteriana é a mais utilizada, especialmente aquelas produzidas por *Bacillus amyloliquefaciens* e *Bacillus subtilis*, cuja aplicação ocorre em temperaturas entre 50 e 80°C e em faixas de pH de 6 a 7. No entanto, é fundamental destacar que essas enzimas apresentam sensibilidade a variações de pH (MONTEIRO e SILVA, 2009 apud MARROQUES 2020).

## 2.7 BIOTECNOLOGIA

Conforme a definição da *European Federation of Biotechnology*, (1988), a biotecnologia envolve a aplicação integrada da bioquímica, microbiologia e engenharia para utilizar microrganismos, células cultivadas (animais ou vegetais) ou seus componentes em setores como indústria, saúde e meio ambiente. O uso da biotecnologia conforme (Figura 42), começou com os processos de fermentação, uma prática tão antiga que está entrelaçada com a própria trajetória da humanidade. Desde civilizações antigas, a fermentação foi utilizada para produzir alimentos e bebidas, sendo um dos primeiros exemplos de aplicação biotecnológica (Zille, Andrea 2011).

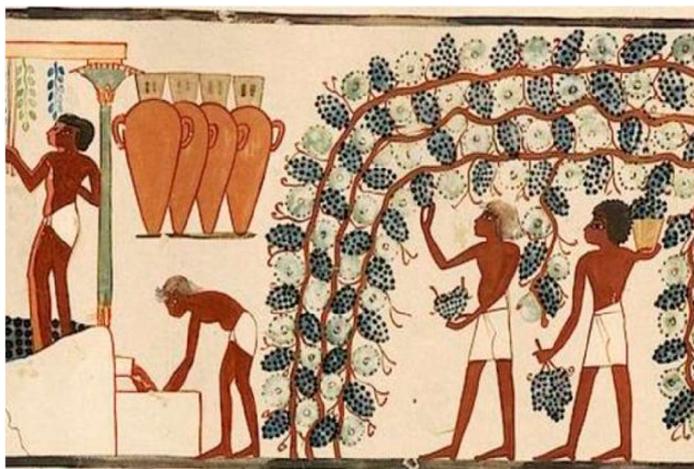
Figura 42 - Biotecnologia



Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

No início, a biotecnologia era fundamentada em práticas empíricas (Figura 43), sem conhecimento sobre microrganismos ou as leis da hereditariedade. Os processos eram desenvolvidos com base na observação e na experiência, sem a compreensão científica que viria mais tarde (Zille, Andrea 2011).

Figura 43 - Biotecnologia Empírica



Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

Conforme Zille, Andrea (2011), a biotecnologia moderna começou a se formar em 1857, quando Louis Pasteur demonstrou que a fermentação alcoólica ocorria devido à ação de fungos. Em 1917, Chaim Weizmann inovou ao utilizar uma cultura microbiológica pura em um processo industrial, produzindo acetona a partir do amido de milho. Já em 1928, Alexander Fleming revolucionou a medicina ao descobrir a penicilina, iniciando a era dos antibióticos. A transição da biotecnologia tradicional para a moderna ocorreu entre 1971 e 1973, período em que Paul Berg desenvolveu técnicas de recombinação de DNA, enquanto Herbert Boyer e Stanley Cohen conseguiram inserir um gene de sapo africano no DNA de uma bactéria, dando início à engenharia genética. Com essa evolução, a engenharia genética se tornou um pilar central na transformação da biotecnologia de laboratório em uma ferramenta industrial essencial.

A biotecnologia aplicada aos têxteis (Figura 44) abrange técnicas como a catálise enzimática (Figura 45) no processamento de tecidos, o tratamento biológico de efluentes e o uso de dispositivos biológicos em substratos têxteis, promovendo inovação e sustentabilidade na indústria (Zille, Andrea 2011).

Figura 45 - Substrato têxtil



Figura 44 - Catálise enzimática



Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Milho

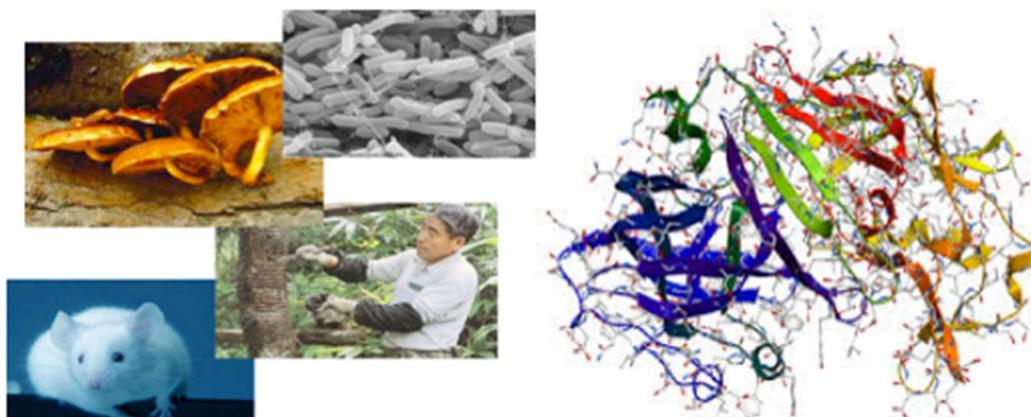
A aplicação da biotecnologia na indústria têxtil remonta há mais de 2000 anos, quando micróbios eram utilizados na maceração de fibras. No início do século XX, extratos de malte de cevada contendo amilase começaram a ser usados para a desengomagem de tecidos. Em 1917, a primeira amilase bacteriana foi isolada, tornando-se referência industrial, e nos anos 50, a Novo Nordisk iniciou sua produção em larga escala a partir do *Bacillus subtilis*.

Por cerca de 70 anos, as amilases foram as únicas enzimas aplicadas na indústria têxtil, até que nos anos 80 as celulases passaram a ser usadas no biopolimento e para criar o efeito “stone-washed” em tecidos celulósicos. Na década de 90, catalases foram introduzidas para degradar o peróxido de hidrogênio pós-branqueamento, reduzindo o consumo de água. Desde então, diversas enzimas foram incorporadas a diferentes processos têxteis, impulsionando a inovação no setor.

### 2.7.1 O que são as Enzimas

De acordo com Zille, Andrea (2011), as enzimas (Figura 46) são proteínas que atuam como catalisadores biológicos, acelerando reações químicas essenciais para a vida. Elas regulam processos celulares, permitindo que ocorram de maneira eficiente.

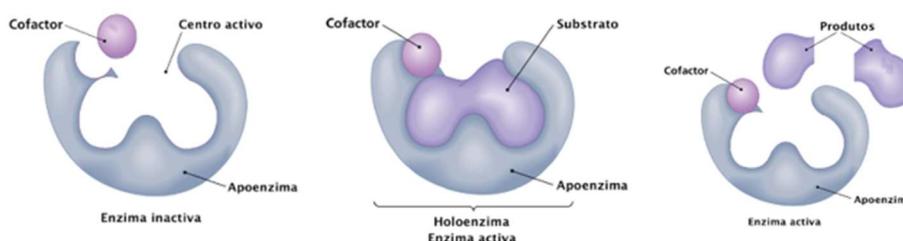
Figura 46 - Catalizadores biológicos



Fonte: 2C2T - Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

As enzimas catalisam reações em condições moderadas, como temperaturas abaixo de 100 °C, pressão atmosférica e pH próximo da neutralidade, minimizando a formação de subprodutos. Quimicamente, são polipeptídeos, mas algumas precisam de cofatores para se tornarem ativas, sendo chamadas de holoenzimas, conforme Figura 47.

Figura 47 - Enzimas

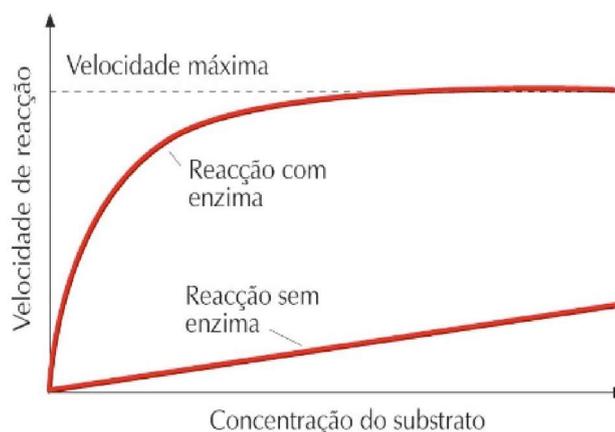


Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

Os cofatores são essenciais para a atividade de algumas enzimas e podem incluir íons metálicos, como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$ , que atuam no centro ativo da enzima. Também podem ser moléculas orgânicas complexas, chamadas coenzimas, ou grupos prostéticos, que permanecem ligados à parte proteica da enzima de forma permanente.

“As Enzimas são catalisadores biológicos extremamente eficientes, acelerando em média milhões de vezes a velocidade de reação, sem, no entanto, participarem como reagentes ou produtos” (Zille, Andrea 2011). Conforme a figura 48.

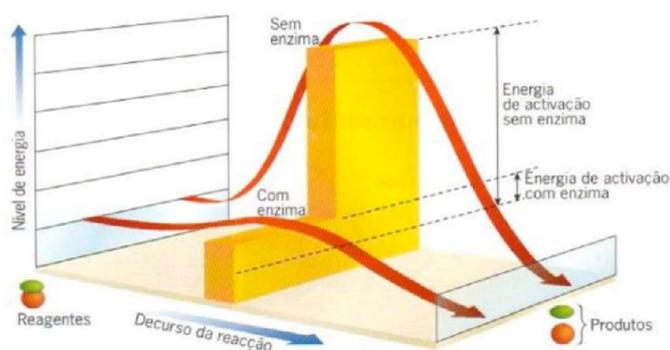
Figura 48 - Gráfico de velocidade de reação da enzima



Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

“As enzimas diminuem a energia de ativação das reações sem alterar o  $\Delta G$  total. As Enzimas coordenam os reagentes, facilitando a sua conversão em produtos” (Zille, Andrea 2011). Conforme a Figura 49.

Figura 49 - Atividade da enzima



Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

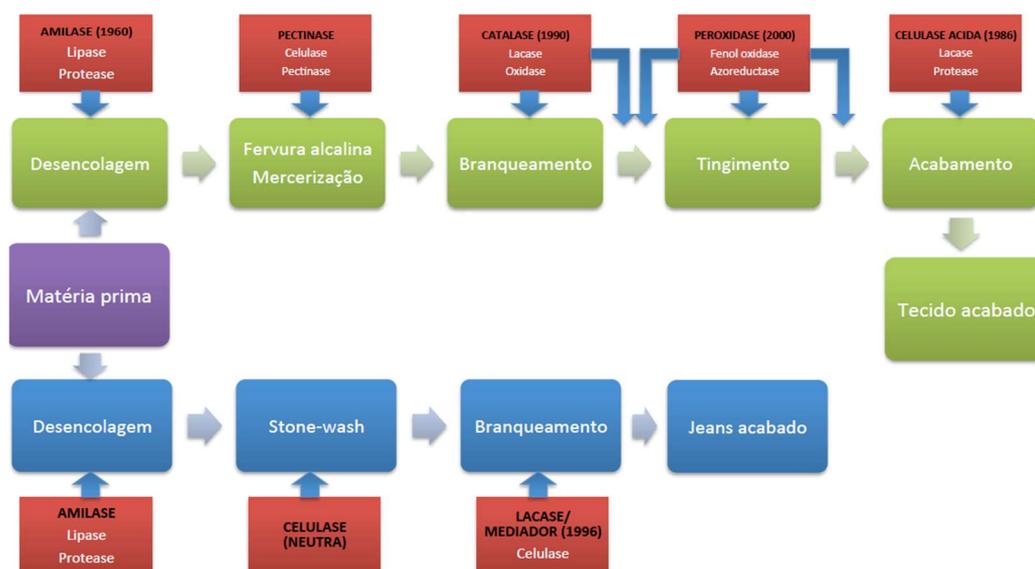
Tabela 2 - Classificação das Enzimas

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: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

As enzimas têm amplo uso industrial, especialmente em detergentes, onde proteases e amilases são as mais empregadas. Enzimas psicrófilas permitem eficácia mesmo em água fria. Mais recentemente, novas enzimas foram incorporadas, como celulases para remover borbotos do algodão, lipases para eliminar manchas de gordura e mananase para degradar a goma de guar, utilizada como estabilizador alimentar (Zille, Andrea 2011). Conforme Figura 50.

Figura 50 - Enzimas nos Processos Têxteis - fluxograma



Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

Tabela 3 - Enzimas nos Processos Têxteis

Enzima	Substrato	Aplicação
<b>Hidrólases</b>		
Amilase	Amido	Desencolagem amido
Celulase	Celulosa	(i) Biopolimento; (ii) Bioacabamento; (iii) Carbonização da lã
Pectinase	Pectina	Substituição fervura alcalina algodão
Catalase	Peroxido	Decomposição In situ do peróxido
Protéase	Proteínas	Antiencolhimento lã e desencolagem seda
Lípase	Gorduras	Desencolagem; aumento hidrofobicidade do PET
<b>Oxidoreductases</b>		
Lacase e Peroxidase	Cromóforos e pigmentos	(i) Biodegradação efluentes tingimento; (ii) Biobranqueamento da lignina; (iii) Biobranqueamento do índigo em denim
Glucose oxidase	Pigmentos	Geração In situ de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e biobranqueamento do algodão

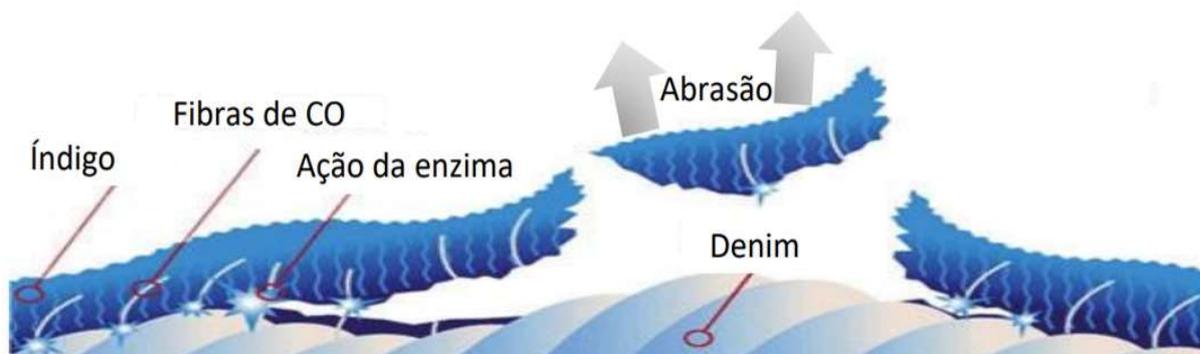
Fonte: 2C2T – Centro de Ciência e Tecnologia Têxtil, Universidade do Minho

### 2.7.2 Bioestonagem

A bioestonagem é uma técnica que utiliza celulase para tratar tecidos Denim, material-base do jeans. Esse tecido, feito de algodão sarjado, possui alta resistência. Tradicionalmente, o desgaste do jeans é obtido por lavagem com pedra-pomes, que removem o excesso de corante índigo, revelando áreas mais claras no tecido. Após esse processo, o clareamento é realizado com hipoclorito de sódio, aprimorando o efeito visual de desgaste (PEDERSEN e SCHNEIDER, 1998 apud MARROQUES, 2020).

Apesar de amplamente utilizadas, as pedra-pomes apresentam desvantagens, como deixar resíduos nos tecidos, gerar pó que pode obstruir tubulações e liberar fragmentos na água residual, exigindo tratamento dessa água. Como alternativa, a bioestonagem com enzimas foi introduzida na Europa em 1989 e nos Estados Unidos em 1990. Nesse método, a celulase desempenha a mesma função, conferindo ao jeans o efeito desbotado desejado (*stonewashed*). Além disso, o uso da enzima reduz a resistência à flexão do tecido, tornando-o mais macio e confortável ao toque (FREITAS, 2009 apud MARROQUES, 2020). O método descrito pode ser observado na Figura 51 que a ação das celulasas no processo de beneficiamento do jeans.

Figura 51 - Ação das celulases em tecidos Denim



Fonte: SARAVANAN et. al., 2009 adaptado de MARROQUES,2020

Para evitar o efeito *backstaining* na bioestonagem, é essencial controlar cuidadosamente a temperatura e a dosagem da celulase. Se não forem ajustadas corretamente, o corante índigo removido pode se redistribuir nos fios brancos ou tingidos devido à sua afinidade com a celulose, comprometendo o acabamento do tecido. Esse fenômeno, conhecido como efeito *backstaining*, pode ser minimizado com um controle preciso dos parâmetros do processo, garantindo um desgaste uniforme do jeans (ANDREAUS, 2001 apud MARROQUES,2020).

De acordo com Cegara (2000 apud MARROQUES,2020) essas enzimas devem atuar em um pH entre 6 e 8, a uma temperatura de 55°C, por aproximadamente uma hora. Andraeus (2001 apud MARROQUES,2020) reforça essas condições, indicando que as celulases neutras devem operar em um pH de 5,5 a 8,0 e a temperaturas de 50 a 60°C (ANDREAUS, 2001; CEGARA, 2000 apud MARROQUES,2020). Essas especificações garantem um processo mais controlado e eficaz na bioestonagem do denim.

Alguns estudos indicam o uso de celulases ácidas, como a *Trichoderma reesei*, de origem fúngica, principalmente devido ao seu baixo custo. Para sua aplicação, recomenda-se um pH entre 4,5 e 6 (AUTERINEN et al., 2004 apud MARROQUES,2020). Essas enzimas são mais agressivas no tratamento do Denim, proporcionando um tempo de lavagem reduzido. Em contrapartida, as celulases neutras apresentam uma ação mais suave e requerem tempos de lavagem mais longos (POLAINA e MACCABE, 2007, p. 54 apud MARROQUES,2020). Esse

contraste influencia a escolha do tipo de enzima conforme as necessidades do processo de bioestonagem.

Segundo Polaina e MacCabe (2007 apud MARROQUES,2020), algumas medidas podem ser adotadas para minimizar o efeito de *backstaining*, como a utilização de celulases com menor especificidade para índigo ou Denim, ajuste na formulação da celulase para garantir uma abrasão eficaz com pouca redeposição, e inclusão de proteases durante ou após a lavagem enzimática. Outras estratégias incluem a adição de agentes clareadores ou produtos químicos anti-redeposição nas etapas de enxágue, além da incorporação de lipases no tratamento enzimático (POLAINA e MACCABE, 2007 apud MARROQUES,2020).

Um estudo de Ramakrishnan et al. (2006) avaliou a aplicação das celulases *Trichoderma* e *Humicola*, fornecidas pela Novozyme, em condições de pH 5 e 7, respectivamente. Os resultados mostraram que a *Humicola* celulase promoveu uma remoção do corante índigo de maneira mais uniforme, contribuindo para um efeito desbotado homogêneo no processo de bioestonagem (RAMAKRISHNAN et al., 2006 apud MARROQUES,2020).

### 3 METODOS E PROCESSOS

#### 3.1 EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

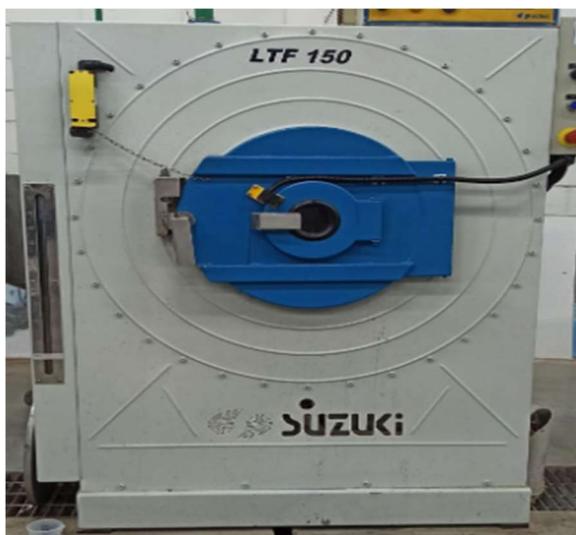
Equipamentos e Acessórios Utilizados nos Ensaio Experimentais.

Para a execução dos ensaios experimentais, foram utilizados os seguintes equipamentos e acessórios, todos pertencentes à infraestrutura da Santista Têxtil.

- Máquina de costura overloque industrial
- Balança analítica de precisão;
- Lavadora industrial;
- Centrífuga;
- Secadora
- medição de força;
- Termômetro digital a laser;
- Régua metálica;
- Tesoura;
- Becker de vidro e de plástico;
- Espátula metálica;
- Fita indicadora de pH.
- Fita medidora de dureza

Todos os instrumentos citados foram fundamentais para garantir a precisão, repetibilidade e confiabilidade dos procedimentos realizados ao longo do estudo experimental, conforme Figuras (52,53 e 54) abaixo.

Figura 52 - Lavadora



Fonte: Autor

Figura 53 - Centrifuga



Fonte: Autor

Figura 54 - Secadora



Fonte: Autor

### 3.1.1 SUBSTRATO

#### Descrição do Substrato e Preparação das Amostras

O substrato utilizado nos ensaios trata-se de um tecido plano do tipo denim, construção com ligamento sarja 3x1 à direita, composição 100% algodão e apresentando gramatura de 339 g/m<sup>2</sup> (equivalente a 10 onças por jarda quadrada). O material foi fornecido pela empresa Santista Têxtil, referência nacional na produção de tecidos para vestuário e indústria.

Para a realização dos experimentos, foram confeccionadas amostras no formato de perninhas, com costura dupla, a fim de facilitar a visualização das marcações de costura geradas durante o processo de estonagem, conforme ilustrado na Figura 55.

Figura 55- Perninhas de tecido Denim



Fonte: Autores

### RECEITAS APLICADAS

Com o objetivo de padronizar os ensaios e permitir comparações consistentes entre diferentes testes, definiu-se a massa de cinco quilogramas por batelada, considerando o substrato seco. Para otimizar o desempenho das lavadoras, as peças foram posicionadas perpendicularmente às pás batedoras. A relação de banho (R:B) foi estabelecida em 1:6, ou seja, para cada quilograma de material seco foram utilizados seis litros de água.

Foram realizados seis ensaios, cada um com variações nas condições ambientais da água utilizada no processo de estonagem com a enzima celulósica e no emprego da barrilha leve, que teve como finalidade a desnaturação da enzima. As diferentes condições empregadas nos testes foram as seguintes:

#### Receitas aplicadas

Teste 1 - 1g/L de enzima celulósica, temperatura (27,4°C), pH neutro (7,2);

Teste 2 - 1g/L de enzima celulósica, temperatura (40°C), pH neutro (7,2);

Teste 3 - 1g/L de enzima celulósica, temperatura (55°C), pH neutro (7,2);

Teste 4 - 1g/L de enzima celulósica, temperatura (27,4°C), pH ácido (3,4);

Teste 5 - 1g/L de enzima celulósica, temperatura (27,4°C), pH alcalino (12);

Teste 6 - 1g/L de enzima celulósica, temperatura (27,4°C), dureza (mais ou menos 300ppm);

Os reagentes utilizados nesses ensaios foram: enzima celulósica (Geopower nps, fornecida Coratex), antimigrante (Bioclean premium, Hitech) e barrilha (carbonato de sódio), ácido oxálico, Cloreto de Calcio (fornecido pela Startech e Sulfato de Magnésio (fornecido pela Startech).A seguir são apresentadas as 6 receitas dos testes realizados:

## STONEWASH – Teste 01

Massa: 5kg

• Desengomagem – R:B 1:6 – 10' – Temperatura ambiente 27,4°C 30 litros

1,0 g/L Enzima alfaamilase

- Esgotar banho

• STONE – R:B 1:6 – 50' – Temperatura ambiente 27,4°C e pH neutro 30 litros

pH inicial: 7,2

0,5 g/l Antimigrante

15 gramas

1,0 g/l Enzima celulósica

30 gramas

pH final: 7

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3'

40 litros

0,5 g/l barrilha leve (desnaturação)

20 gramas

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3'

40 litros

- Esgotar banho

- CENTRIFUGAR

- SECAR – 65°C à 70°C

**STONEWASH – Teste 02**

Massa: 5kg

• Desengomagem – R:B 1:6 – 10' – Temperatura ambiente 27,4°C      30 litros

1,0 g/L Enzima alfaamilase

- Esgotar banho

• STONE – R:B 1:6 – 50' – Temperatura 40°C      30 litros

pH inicial: 7,2

0,5 g/l Antimigrante

15 gramas

1,0 g/l Enzima celulósica

30 gramas

pH final: 7

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3'

40 litros

0,5 g/l barrilha leve (desnaturação)

20 gramas

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3'

40 litros

- Esgotar banho

- CENTRIFUGAR

- SECAR – 65°C à 70°C

**STONEWASH – Teste 03**

Massa: 5kg

• Desengomagem – R:B 1:6 – 10' – Temperatura ambiente 27,4°C 30 litros

1,0 g/L Enzima alfaamilase 30 gramas

- Esgotar banho

• STONE – R:B 1:6 – 50' – Temperatura 55°C 30 litros

pH inicial: 7,2

0,5 g/l Antimigrante 15 gramas

1,0 g/l Enzima celulósica 30 gramas

pH final: 7

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3' 40 litros

0,5 g/l barrilha leve (desnaturação) 20 gramas

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3' 40 litros

- Esgotar banho

- CENTRIFUGAR

- SECAR – 65°C à 70°C

## STONEWASH – Teste 04

Massa: 5kg

• Desengomagem – R:B 1:6 – 10' – Temperatura ambiente 27,4°C 30 litros

1,0 g/L Enzima alfaamilase 30 gramas

- Esgotar banho

• STONE – R:B 1:6 – 50' – Temperatura ambiente 27,4°C e pH ácido 30 litros

pH inicial: 2,7

0,5 g/l Antimigrante 15 gramas

1,0 g/l Enzima celulósica 30 gramas

1,0 g/l Ácido oxálico 30 gramas

pH final: 3

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3' 40 litros

0,5 g/l barrilha leve (desnaturação) 20 gramas

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3' 40 litros

- Esgotar banho

- CENTRIFUGAR

- SECAR – 65°C à 70°C

## STONEWASH – Teste 05

Massa: 5kg

• Desengomagem – R:B 1:6 – 10' – Temperatura ambiente 27,4°C 30 litros

1,0 g/L Enzima alfaamilase 30 gramas

- Esgotar banho

• STONE – R:B 1:6 – 50' – Temperatura ambiente 27,4°C e pH alcalino 30 litros

pH inicial: 11

0,5 g/l Antimigrante 15 gramas

1,0 g/l Enzima celulósica 30 gramas

1,0 g/l Barrilha 30 gramas

pH final: 10

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3' 40 litros

0,5 g/l barrilha leve (desnaturação) 20 gramas

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3' 40 litros

- Esgotar banho

- CENTRIFUGAR

- SECAR – 65°C à 70°C

## STONEWASH – Teste 06

Massa: 5kg

• Desengomagem – R:B 1:6 – 10' – Temperatura ambiente 27,4°C 30 litros

1,0 g/L Enzima alfaamilase 30 gramas

- Esgotar banho

• STONE – R:B 1:6 – 50' – Temperatura ambiente 27,4°C e água dura 30 litros

pH inicial: 7,2

Dureza +- (300ppm)

0,5 g/L Antimigrante 15 gramas

1,0 g/L Enzima celulósica 30 gramas

0,735 g/L Cloreto de cálcio 22,05 gramas

0,496 g/L Sulfato de Magnésio 14,88 gramas

pH final: 7

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3' 40 litros

0,5 g/l barrilha leve (desnaturação) 20 gramas

- Esgotar banho

→ Enxágue R:B 1:8 – 3' 40 litros

- Esgotar banho

- CENTRIFUGAR

- SECAR – 65°C à 70°C

A centrifugação das peças foi feita por cinco minutos e secagem em secador tambor rotativo entre 65 °C a 70 °C durante 50 minutos e resfriamento de 5 minutos no final do processo.

### **3.1.2 Resistência à Ruptura e Alongamento de Tecidos Têxteis – Método**

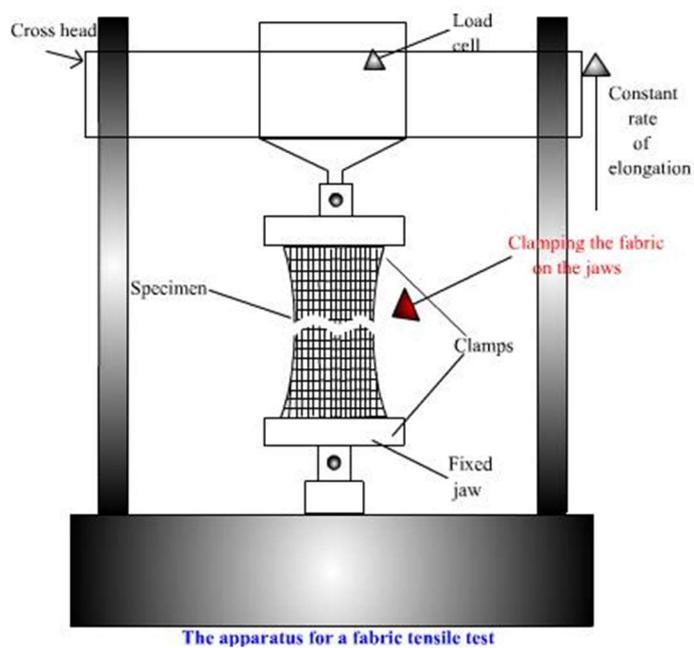
#### **ASTM D 6554**

A norma correspondente ao método de ensaio é ASTM D 6554, (Figura 56) este método é destinado à avaliação da resistência à ruptura e do alongamento de tecidos têxteis, por meio do ensaio conhecido como método de garra ou sua variação modificada. Ressalta-se que esses testes podem ser realizados tanto com amostras secas quanto no estado úmido (TINA, 2025).

O procedimento denominado método de garra figura 59 é apropriado para testar tecidos planos, lã e materiais que apresentam tendência a encolhimento, ao passo que a variação modificada desse método é recomendada, principalmente, para tecidos planos. É importante salientar que este método não é indicado para tecidos de fibra de vidro, malhas ou outros materiais com alta elasticidade (acima de 11%) (TINA, 2025).

De acordo com (TINA, 2025) para a determinação da resistência à ruptura e do alongamento em tecidos têxteis por meio do método de fio de ourela ou do método de tira cortada, recomenda-se a utilização da norma ASTM D 5035. A aplicação do método pode ser realizada em duas unidades de medida distintas: polegada-libra e SI (Sistema Internacional). A prática nos Estados Unidos prioriza a utilização de polegada-libra, enquanto os padrões internacionais tendem a adotar o Sistema Internacional. Vale destacar que essas unidades de medida não são equivalentes, e cada uma delas deve ser utilizada de acordo com o padrão correspondente.

Figura 56 - Método Grab ASTM 6554



Fonte: Chiuvention

## 4 RESULTADOS

As análises de resistência a tração foram feitas pelo método *Grab* conforme a norma - ASTM D 6554 e a tolerância de resistência é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Tolerâncias método *Grab* – ASTM D 6554

<b>Tolerâncias para Resistência a Tração Método GRAB - ASTM D 6554</b>			
<b>Tolerâncias conforme - ASTM D 6554</b>			
<b>Tipo de Tecido</b>	<b>Gramatura g/M2</b>	<b>Resistência (URDUME)</b>	<b>Resistência (TRAMA)</b>
Leve	Abaixo de 271	356	178
Médio	272 á 465	578	244
Pesado	Acima de 466	801	312

Fonte: ASTM D 6554

Com as amostras devidamente preparadas e o equipamento calibrado, foram efetuados os ensaios e os resultados da resistência está apresentado na Tabela 5, com os dados organizados em relação aos testes efetuados.

Tabela 5 - Resultados de resistência a tração pelo método Grab Trama (N)

<b>Teste de Enzima</b>		
<b>100% Algodão</b>		
		<b>Grab Trama (N) (ASTM D 5034 )</b>
Amostras lavadas	1	320,97
	2	336,27
	3	329,21
	4	388,05
	5	374,22
	6	357,55
Amostra Rígida	<b>7</b>	368,53

Fonte: Autor

#### 4.1 Análise dos Resultados Obtidos nos Ensaio

A análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados permite destacar os seguintes pontos principais:

- Teste-1:

Em condições ideais, caracterizadas por temperatura ambiente 27,4°C, pH neutro e ausência de dureza na água, a enzima celulósica apresentou o melhor desempenho no processo de estonagem;

- Teste-2:

Com temperatura de 40°C, pH neutro e água sem dureza, observou-se que o aumento da temperatura começou a interferir na ação da enzima, resultando em uma leve perda de eficiência no processo de estonagem;

- Teste-3:

A uma temperatura de 55°C, mantendo-se pH neutro e água sem dureza, a interferência térmica na atividade da enzima uma leve perda de eficiência no processo de estonagem;

- Teste-4:

Quando submetida a temperatura ambiente 27,4°C, pH ácido e água sem dureza, a enzima celulósica não apresentou nenhuma atividade, indicando a total inibição de sua ação sob estas condições;

- Teste-5:

Em condições de temperatura ambiente 27,4°C, pH alcalino e água sem dureza, a ação da enzima também foi completamente nula, demonstrando sua sensibilidade a variações do pH;

- Teste-6:

Por fim, com temperatura ambiente 27,4°C, pH neutro e água com dureza elevada, a enzima não apresentou atividade, evidenciando que a presença de sais minerais na água é um fator determinante para a inibição da ação enzimática;

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso demonstrou de forma empírica e detalhada a crucial influência dos parâmetros da água na atividade da enzima celulósica, um componente vital nos processos de acabamento têxtil, especialmente no Stone Wash de tecidos denim. Os resultados mais importantes revelaram que o desempenho ótimo da enzima é alcançado em condições de pH neutro, temperatura ambiente (aproximadamente 27°C) e água com baixa dureza. Em contrapartida, ambientes com pHs extremos, tanto ácidos quanto alcalinos, e a presença de água com alta dureza (cerca de 300 ppm) inibiram significativamente, e em alguns casos completamente, a ação enzimática. Observou-se também que temperaturas moderadamente elevadas (entre 40°C e 55°C) resultaram em uma leve perda de eficiência em comparação com a temperatura ambiente, destacando a sensibilidade da enzima às variações térmicas. Essa constatação é uma contribuição fundamental para a área de estudo, sublinhando a necessidade de um controle rigoroso da qualidade da água nos processos biotecnológicos têxteis.

A pesquisa respondeu diretamente ao problema inicialmente proposto, que buscava compreender como as variáveis ambientais da água afetam a eficiência da enzima celulósica. Através de uma série de ensaios controlados, foi possível evidenciar que a dureza, o pH e a temperatura da água são fatores determinantes para a degradação controlada da celulose e, conseqüentemente, para o efeito desejado no tecido. Todos os objetivos propostos na introdução foram plenamente alcançados: avaliou-se o impacto da dureza da água, analisou-se a eficiência da enzima em diferentes faixas de pH e determinou-se a influência da temperatura, tudo isso quantificado por meio de análises de resistência à tração do tecido.

A relevância deste trabalho é multifacetada. Para a indústria têxtil, os resultados oferecem subsídios práticos e imediatos para a otimização dos processos de lavagem de denim, permitindo que as empresas ajustem suas condições operacionais para maximizar a eficácia da enzima. Isso pode levar a uma redução no consumo de enzimas, melhoria na consistência da qualidade do produto final e diminuição dos custos operacionais. Além disso, ao otimizar o uso de enzimas, o estudo contribui para a promoção de práticas mais sustentáveis, minimizando a dependência de produtos químicos agressivos e reduzindo o impacto ambiental associado ao descarte de efluentes.

Para futuras pesquisas, sugere-se aprofundar a investigação sobre os mecanismos moleculares específicos de inibição da enzima por íons presentes na água dura ou por pHs extremos. Seria valioso explorar o desenvolvimento ou a aplicação de enzimas celulósicas com maior tolerância a essas condições adversas, bem como a eficácia de aditivos que possam mitigar os efeitos inibitórios. Outra linha de pesquisa promissora seria a análise do impacto a longo prazo desses tratamentos enzimáticos otimizados na durabilidade e nas propriedades físicas dos tecidos, além da resistência à tração. Finalmente, a realização de estudos comparativos mais amplos, que incluam a avaliação de custos e benefícios ambientais de diferentes abordagens de Stone Wash (enzimática versus mecânica tradicional), poderia fornecer uma visão ainda mais abrangente para a indústria.

Em considerações finais, este estudo reforça a importância da biotecnologia como ferramenta para a inovação e sustentabilidade na indústria têxtil. Ao desvendar a complexa interação entre as enzimas celulósicas e o ambiente aquático, o trabalho não apenas enriquece o conhecimento científico na área, mas também oferece diretrizes concretas para aprimorar a eficiência e a responsabilidade ambiental dos processos de acabamento de denim. É um passo significativo em direção a uma produção têxtil mais inteligente e ecologicamente consciente.

## REFERÊNCIAS

ABIT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO. *Cartilha indústria têxtil*. São Paulo, 2019.

ALVES, Constantino Monteiro. *Fiação do algodão – tipos de algodão e processos de fabrico*. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/constantinomonteiroalves/fiao-doalgodo-tipos-de-algodes-e-processos-de-fabrico>. Acesso em: 10 abr. 2019.

ALVES, E. R. A crise do algodão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA AGRÁRIA. *Anais*. 2006.

AMADIO, Felipe Augusto. *Tingimento com corante índigo e suas propriedades*. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Produção Têxtil) – Faculdade de Tecnologia de Americana, Americana, 2012.

AMIPA. *Beneficiamento*. Disponível em: <http://www.amipa.com.br/ben-algodoeiras>. Acesso em: 05 jan. 2019.

AMPA – ASSOCIAÇÃO MATOGROSSENSE DOS PRODUTORES DE ALGODÃO. *História do algodão*. Cuiabá: AMPA, 2017.

ARAÚJO, M. A. *Manual de engenharia têxtil*. São Paulo: SENAI, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR ISO 13934-1:2016 – Materiais têxteis – Propriedades de tração de tecidos – Parte 1: Determinação da força máxima e alongamento à força máxima utilizando o método de tira em dinamômetro*. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D5034-09(2017): Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test)*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

BANGE, M. et al. *FIBREpak: from seeds to good shirts*. CSIRO, 2009.

BARCHET, T. T.; ROCHA, A. R.; DAL PAI, D. R. O mercado algodoeiro e suas transformações. *Revista Brasileira de Agronegócio*, v. 12, n. 1, p. 45-67, 2016.

BELLOT, J. L. *Manual de qualidade da fibra*. Cuiabá: AMPA-IMAmt, 2018.

CAMARGO, Lucas Henrique de. *Processos de beneficiamento e fiação do algodão*. 2019. 39 f. Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil) – Faculdade de Tecnologia de Americana, Americana, 2019.

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. *Dados sobre a cadeia produtiva do algodão*. Piracicaba: Cepea, 2020. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br>. Acesso em: 24 fev. 2025.

COENT, Angélica Patrícia. *Estudo sobre tingimento com corante índigo: tecnologias e processos industriais*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Têxtil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana. Disponível em: [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5740/1/AP\\_COENT\\_2018\\_1\\_02.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5740/1/AP_COENT_2018_1_02.pdf). Acesso em: 19 abr. 2025.

COSTA, Bruno et al. *Processos de tingimento e beneficiamento têxtil*. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], 2016.

FÓRUM TÊXTIL. Índigo: a cor que atravessa a história. Disponível em: <http://www.forumtextil.com.br/indigo.htm>. Acesso em: 22 mar. 2025.

HEQUET, E.; KELLY, B. *The future of cotton fibers*. 2013.

JEANSWEAR. Produção do índigo sintético. Disponível em: <http://jeanswear.blogspot.com.br/2007>. Acesso em: 20 abr. 2025.

MARIANO, J. *Processos de produção de fios*. 2002.

MORAES, Cristine do C. S. B. *Template para trabalho de conclusão de curso da Faculdade de Tecnologia de Americana*. Americana, SP: FATEC, 2013.

NUNES, Fernando R. M.; SILVA, Maria Amélia R.; NUNES FILHO, Fernando R. M. Propriedades mecânicas das fibras de algodão usadas na indústria de fiação Open End para fabricação de tecido denim: estudo de caso das indústrias do Ceará. *Revista*, 1999. Disponível em: AACDDF.pdf. Acesso em: 02 mar. 2025.

PESSANHA, D. R. *Tecnologia da engomagem*. 1. ed. Rio de Janeiro: SENAI-CETIQT, 1989.

SAKTHIVEL, T. Indigo – A historical perspective. *Textile Review*, v. 1, n. 2, p. 24-26, 2011.

SANTOS, R. B. B.; ANTONIOLLI, I. S. *Fiação Open-End e suas inovações*. Americana, SP, 2012.

SOUZA, C. S. *Variação de temperatura e umidade na fiação de algodão*. Natal, RN, 2011.

TEXTILELEARNER. Loop dyeing process. 2025. Disponível em: <https://www.textilelearner.net>. Acesso em: 21 abr. 2025.

TINA. Resistência à ruptura e alongamento de tecidos têxteis – Método ASTM D 5034-Grab. Disponível em: <https://chiuvention.com/pt/blog/breaking-strength-and-elongation-of-textile-fabrics-astm-d-5034-grab-method>. Acesso em: 27 maio. 2025.

UNSPLASH. Campo de algodão em plena colheita. Disponível em: <https://unsplash.com/pt-br>. Acesso em: 26 fev. 2025.

WELSCH, T. Indigo and its colour properties. In: COSTA, Bruno et al. *Processos de tingimento e beneficiamento têxtil*. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], 2016.

WIKIPÉDIA. Índigo. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Índigo>. Acesso em: 21 abr. 2025.