

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GIOVANNA NAOMI MURAKAWA CARDOSO

**Análise dos impactos ambientais na cadeia têxtil por meio da
abordagem de ciclo de vida: revisão da literatura com foco na
produção de denim**

São Carlos - SP

2025

GIOVANNA NAOMI MURAKAWA CARDOSO

**Análise dos impactos ambientais na cadeia têxtil por meio da
abordagem de ciclo de vida: revisão da literatura com foco na
produção de denim**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia
Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos,
Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção
do título de licenciatura em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Montaño

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C268a Cardoso, Giovanna Naomi Murakawa
Análise dos impactos ambientais na cadeia têxtil
por meio da avaliação do ciclo de vida: contribuições
da economia circular e da bioeconomia para a mitigação
desses efeitos / Giovanna Naomi Murakawa Cardoso;
orientador Marcelo Montaño. São Carlos, 2025.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2025.

1. Indústria têxtil - denim. 2. Impactos
ambientais. 3. Gestão de resíduos. 4. Sustentabilidade
ambiental.. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Giovanna Naomi Murakawa Cardoso**

Data da Defesa: 12/11/2025

Comissão Julgadora:

Marcelo Montaño (Orientador(a))

Resultado:

aprovado

Dante José de Oliveira e Peixoto

aprovado

Edimilson Rodrigues dos Santos Junior

aprovado



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

Dedico este trabalho a meus pais, Claudinei e Tatiana, que tanto fizeram para que eu chegasse até aqui. E ao Daniel, que sempre me incentiva a estar pronta para todas as oportunidades que batem à porta.

RESUMO

A indústria têxtil está entre os setores que mais geram impactos ambientais no mundo. Diante dessas preocupações ecológicas, torna-se essencial adotar estratégias eficazes para reduzir tais efeitos. Isso se aplica de forma particularmente relevante ao denim, que é tradicionalmente produzido a partir de algodão, uma cultura com alto potencial poluidor, e tingido com Índigo, um corante cuja baixa taxa de fixação está associada a significativos problemas ambientais. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma ferramenta fundamental nesse contexto, pois permite analisar os impactos ambientais em cada etapa da trajetória de um produto, desde a extração da matéria-prima e cultivo, passando pela fabricação, distribuição, uso, manutenção e reparo, até a destinação final, seja por descarte ou reciclagem. Esses dados fornecem subsídios estratégicos para a adoção de práticas mais sustentáveis e representam um dos primeiros passos para a mitigação dos impactos ambientais. Neste sentido, compreender o ciclo de vida do denim e seus efeitos sobre os ecossistemas possibilita orientar ações mais responsáveis no setor. O objetivo deste estudo é analisar os impactos ambientais e os processos de sustentabilidade e bioeconomia associados à cadeia têxtil por meio da ACV, com ênfase na produção de denim. A metodologia utilizada foi de revisão bibliográfica, com abordagem qualitativa e exploratória. Os resultados demonstram que a produção convencional de *denim* apresenta elevado consumo de água, energia e produtos químicos, especialmente na etapa de cultivo do algodão e no tingimento com índigo, sendo essas fases as mais críticas em termos de impactos ambientais. A aplicação da ACV permitiu identificar oportunidades para a redução desses impactos, evidenciando que a adoção de algodão orgânico ou reciclado, processos de tingimento mais eficientes e estratégias de reaproveitamento de resíduos podem diminuir significativamente o consumo de recursos e a emissão de poluentes. Além disso, a integração de práticas de economia circular e bioeconomia mostra-se eficaz na promoção de um ciclo produtivo mais sustentável, permitindo a reinserção de resíduos têxteis na cadeia produtiva, a valorização de subprodutos e a utilização de insumos renováveis. Essas estratégias contribuem não apenas para a mitigação de impactos ambientais, como também para ganhos econômicos e sociais, fortalecendo a competitividade do setor e promovendo inovação. Assim, a ACV, aliada a abordagens circulares e bioeconômicas, se apresenta como uma ferramenta essencial para orientar decisões estratégicas e viabilizar a transição da indústria têxtil para um modelo mais sustentável e resiliente.

Palavras-chave: Indústria têxtil – denim; Impactos ambientais; Gestão de resíduos; Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT

The textile industry is among the sectors that generate the greatest environmental impacts worldwide. In light of these ecological concerns, it is essential to adopt effective strategies to reduce such effects. This is particularly relevant for denim, which is traditionally produced from cotton, a crop with high pollution potential, and dyed with indigo, a dye whose low fixation rate is associated with significant environmental problems. Life Cycle Assessment (LCA) emerges as a key tool in this context, as it allows the analysis of environmental impacts at each stage of a product's life, from raw material extraction and cultivation, through manufacturing, distribution, use, maintenance, and repair, to final disposal, whether through waste or recycling. This data provides strategic support for adopting more sustainable practices and represents one of the first steps toward mitigating environmental impacts. In this sense, understanding the life cycle of denim and its effects on ecosystems enables more responsible actions within the sector. The objective of this study is to analyze the environmental impacts and the processes of sustainability and bioeconomy associated with the textile chain through LCA, with an emphasis on denim production. The methodology used was a bibliographic review with a qualitative and exploratory approach. The results show that conventional denim production involves high water, energy, and chemical consumption, especially during cotton cultivation and indigo dyeing, the most critical stages in terms of environmental impact. The application of LCA made it possible to identify opportunities to reduce these impacts, highlighting that adopting organic or recycled cotton, more efficient dyeing processes, and waste recovery strategies can significantly reduce resource consumption and pollutant emissions. Furthermore, integrating circular economy and bioeconomy practices has proven effective in promoting a more sustainable production cycle, enabling the reintegration of textile waste into the production chain, the valorization of by-products, and the use of renewable inputs. These strategies contribute not only to environmental impact mitigation but also to economic and social gains, strengthening the sector's competitiveness and fostering innovation. Thus, LCA, combined with circular and bioeconomic approaches, emerges as an essential tool to guide strategic decisions and enable the transition of the textile industry toward a more sustainable and resilient model.

Keywords: Textile industry – denim; Environmental impacts; Waste management; Environmental sustainability.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 METODOLOGIA	11
3 ESTRUTURA E CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA TÊXTIL	13
3.1 HISTÓRIA DA INDÚSTRIA TÊXTIL: FOCO EM TÊXTEIS DE ALGODÃO	13
3.2 FIBRAS USADAS NA PRODUÇÃO DE TECIDOS	14
3.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA E CADEIA PRODUTIVA DO <i>DENIM</i>	15
3.3.1 Linha de Produção	16
3.3.2 Cultivo de Algodão	18
3.3.4 Fiação	20
3.3.5 Tingimento	20
3.3.6 Tecelagem	22
3.3.7 Acabamento	23
3.3.8 Confecção	24
3.3.9 Lavagem e Acabamento Final	25
3.4 IMPACTOS DOS PROCESSOS	26
4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS: ECONOMIA CIRCULAR E BIOECONOMIA	28
4.1 ACV	28
4.1.1 Resíduos Têxteis	32
4.1.2 Processo de Reciclagem Têxtil	36
4.1.3 Reciclagem Têxtil em outros Países	41
4.1.4 Impactos dos Processos	43
4.2 ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS: ECONOMIA CIRCULAR E BIOECONOMIA	44
4.2.1 Economia Circular	44
4.2.2 Bioeconomia	48
4.2.3 Integração com ACV para Decisões Sustentáveis	49
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

Os têxteis, enquanto mercadorias submetidas a processos industriais, representam uma das atividades produtivas mais antigas da humanidade, desempenhando papel central no desenvolvimento econômico e social ao longo da história (Beckert, 2014). No entanto, a crescente demanda global por produtos têxteis tem intensificado a pressão sobre os recursos naturais, agravando problemas ambientais, sobretudo devido a modelos de produção baseados na exploração intensiva e indiscriminada desses recursos (Muthu, 2014). Em um contexto global marcado pela escassez de matérias-primas e pela urgência de práticas produtivas mais responsáveis (Peixoto *et al.*, 2022), torna-se imprescindível compreender a relação entre o setor têxtil, a sustentabilidade e a bioeconomia.

Segundo Lilyan Berlim (2012, p. 32), “o setor têxtil pode ser definido como aquele que transforma fibras em fios, fios em tecidos planos e malhas”, gerando uma ampla gama de produtos que vão desde vestuário e artigos domésticos até substratos técnicos para indústrias automotiva, agrícola e hospitalar. Trata-se de um segmento que movimenta cadeias produtivas complexas e intensivas em recursos naturais.

Conforme dados da Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT), o setor têxtil e de confecção ocupa posição de destaque: gerou cerca de 1,30 milhão de empregos formais diretos em 2023, alcançando 8 milhões de pessoas se considerados os empregos indiretos e efeito-renda. Aproximadamente 75% da mão de obra direta é feminina. O volume da produção têxtil foi de cerca de 2 milhões de toneladas no mesmo ano, com um faturamento da cadeia de R\$ 203,9 bilhões, sendo estimados R\$ 215 bilhões para 2024 (ABIT, 2025).

Apesar da relevância econômica e social, a indústria têxtil é também uma das maiores consumidoras de água entre os setores industriais (Almeida, Dilarri; Corso, 2016; Carvalho, 2024; Muthu, 2014), especialmente nas etapas de tinturaria e acabamento, que demandam de 50 a 100 litros de efluentes por quilo de tecido produzido (Almeida, Dilarri; Corso, 2016). Além disso, envolve um elevado consumo energético e a geração de resíduos sólidos e líquidos de difícil tratamento (Fialho, 2024). Essa realidade evidencia a necessidade de um novo modelo de produção e consumo, alinhado aos princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conforme Associação Brasileira de Normas

Técnicas (ABNT NBR ISO 14040:2009), é um instrumento que permite identificar e quantificar aspectos e impactos ambientais ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até a disposição final. Essa abordagem possibilita uma visão holística e científica sobre os fluxos de energia e materiais envolvidos, permitindo apoiar decisões estratégicas para reduzir a sobrecarga ambiental (Thabrew; Ries, 2009).

Além disso, a bioeconomia, entendida como o uso de recursos biológicos renováveis para a produção sustentável de bens e serviços, surge como vetor importante para a transformação de um modelo linear para um modelo circular de produção, com maior reaproveitamento de materiais e valorização de resíduos têxteis.

A problemática central deste estudo parte da seguinte questão: como a ACV pode contribuir para a identificação e mitigação dos impactos ambientais da cadeia têxtil, com foco na produção de *denim*, e para a adoção de práticas baseadas em sustentabilidade e bioeconomia?

Diante desse cenário, torna-se imprescindível compreender e quantificar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo produtivo do setor têxtil, especialmente na produção de *denim*. Para isso, este estudo adota a ACV como ferramenta metodológica central, permitindo mapear e analisar os impactos desde a extração da matéria-prima até o descarte ou reaproveitamento do produto final. A abordagem baseada na ACV fornece uma visão sistêmica do processo produtivo, identificando os pontos críticos e subsidiando estratégias de mitigação alinhadas à economia circular e à bioeconomia.

Nesse contexto, o objetivo geral desta monografia é analisar os impactos ambientais e os processos de economia circular e bioeconomia associados à cadeia têxtil por meio da ACV, com ênfase na produção de *denim*.

Como objetivos específicos têm-se: Estudar a ACV como ferramenta de análise de viabilidade ambiental para o setor têxtil; Identificar e avaliar os impactos ambientais em cada etapa do ciclo de vida do *denim*; Investigar possibilidades de reaproveitamento e reciclagem de fibras têxteis, alinhadas à bioeconomia e à economia circular; e, Analisar padrões de consumo e seus reflexos sociais sobre o processo produtivo.

A metodologia adotada neste estudo teve caráter exploratório e descritivo, com base em revisão bibliográfica e normativas nacionais e internacionais sobre ACV, sustentabilidade e bioeconomia no setor têxtil. O estudo se concentrou especificamente na cadeia produtiva de peças confeccionadas em *denim*, identificando lacunas e oportunidades para adoção de estratégias mais sustentáveis.

Para atingir os objetivos propostos neste estudo, o trabalho está estruturado em seções que permitem uma abordagem lógica, coerente e aprofundada do tema central. Essa Introdução apresenta o contexto da pesquisa, os objetivos gerais e específicos, bem como a justificativa que sustenta a relevância do estudo no cenário atual da indústria têxtil e da sustentabilidade.

Na sequência, a Metodologia descreve os procedimentos adotados para o desenvolvimento da pesquisa, incluindo os métodos utilizados para coleta e análise de dados, de forma a garantir a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos.

A Revisão Bibliográfica, seção sequente, reúne conceitos fundamentais, histórico e evolução da indústria têxtil, com foco nas fibras de algodão e no *denim*, tecido amplamente utilizado no mundo. Essa seção contempla a trajetória histórica, desde o cultivo do algodão até as etapas da linha de produção, incluindo fiação, tingimento, tecelagem, acabamento, confecção e lavagem final, permitindo compreender toda a complexidade da cadeia produtiva têxtil.

A quarta seção é dedicada à ACV, abordando os impactos ambientais gerados ao longo de cada etapa da cadeia produtiva. Também são discutidos os resíduos têxteis, os processos de reciclagem, as experiências internacionais de gestão e reaproveitamento desses materiais e os impactos ambientais e sociais decorrentes dessas práticas. Nesta etapa, são apresentados conceitos e estratégias relacionadas à economia circular e à bioeconomia, ressaltando sua importância na construção de modelos produtivos mais sustentáveis e eficientes.

A lista de referências apresenta as fontes teóricas e empíricas que fundamentam a construção deste trabalho, assegurando o rigor científico e a credibilidade da pesquisa.

Com essa abordagem, pretende-se contribuir para o avanço das discussões sobre produção têxtil responsável no Brasil, oferecendo subsídios para o desenvolvimento de práticas industriais mais eficientes, ambientalmente corretas e alinhadas aos princípios da bioeconomia e da economia circular, com base em uma análise sistêmica orientada pela ACV.

Dessa forma, a ACV constitui-se como o eixo estruturante desta pesquisa, orientando a análise dos impactos ambientais, das estratégias de mitigação e da integração de princípios de sustentabilidade, economia circular e bioeconomia ao longo de toda a cadeia têxtil.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada de forma a permitir uma análise aprofundada e sistemática dos impactos ambientais e dos processos de sustentabilidade e bioeconomia associados à cadeia têxtil, com ênfase na produção de *denim* e no uso de fibras de algodão. Para alcançar esse objetivo, optou-se por uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica, que permite compreender fenômenos complexos a partir da análise e interpretação de informações disponíveis em diferentes tipos de fontes (Gil, 2019; Lakatos; Marconi, 2021). Uma revisão bibliográfica vai além de apenas compilar informações já existentes, ela também desempenha um papel fundamental na construção de novos caminhos interpretativos e no desenvolvimento de novos entendimentos sobre determinado tema. Ao articular diferentes perspectivas teóricas, identificar lacunas do conhecimento e estabelecer conexões entre autores e abordagens, cria-se uma base sólida para novas hipóteses, interpretações e propostas de investigação.

Segundo Boaventura de Sousa Santos (2008, p. 38), “todo conhecimento é uma tradução e uma reinvenção, e não uma simples reprodução”. Assim, a revisão bibliográfica pode ser vista como um espaço de reflexão crítica que amplia horizontes e redefine conceitos, permitindo a emergência de novas agendas de pesquisa e de novos marcos teóricos.

Além disso, Severino (2018, p. 49) destaca que “o estudo sistemático da literatura existente permite ao pesquisador apropriar-se criticamente do saber acumulado, recriando-o e ampliando-o”.

Inicialmente, foi realizado um levantamento histórico e técnico da cadeia produtiva têxtil, contemplando desde o cultivo do algodão, principal matéria-prima, até as etapas de fiação, tingimento, tecelagem, acabamento, confecção e lavagem final. Essa etapa foi essencial para compreender a complexidade dos fluxos produtivos e identificar os principais pontos críticos de geração de impactos ambientais e sociais.

Com base nos conceitos da ACV, realizou-se uma análise dos impactos ambientais associados a cada fase do ciclo de produção, considerando aspectos como consumo de recursos naturais, emissões atmosféricas, geração de resíduos e uso de produtos químicos. A escolha da ACV como ferramenta metodológica se justifica pelo seu potencial de identificar impactos ao longo de todo o ciclo de vida do produto, fornecendo subsídios para decisões mais sustentáveis e estratégicas no setor (ISO 14040:2006; ISO 14044:2006).

Na segunda etapa, buscou-se compreender e analisar estratégias de mitigação desses impactos, com foco nos processos de reciclagem têxtil. Foram investigados modelos e

práticas adotados, por meio de publicações técnicas e relatórios de empresas e associações setoriais, bem como experiências internacionais, como as da Alemanha, Suécia e Turquia, que se destacam pela implementação de políticas públicas e modelos inovadores de reaproveitamento e reuso de materiais têxteis. Além disso, foram incorporados conceitos de economia circular e bioeconomia, que orientam novos paradigmas de produção e consumo mais eficientes e regenerativos.

A seleção das fontes seguiu critérios de relevância, atualidade e confiabilidade, priorizando artigos científicos indexados em bases reconhecidas, como *ScienceDirect*, *SciELO* e *Google Scholar*, além de relatórios técnicos de organizações nacionais e internacionais, como United Nations Environment Programme (UNEP), Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) e Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (ABIT). Os descritores para recuperação da literatura foram, conforme a contrução de cada seção, “cultivo de algodão” priorizando documentos que trataram do *denim*; “processo textil – *denim*” “impactos do cultivo”; “impactos - confecção”; “ciclo de vida”; “economia circular”; “bioeconomia”. Para garantir a consistência da análise, os dados foram classificados e organizados por categorias temáticas, como “produção”, “impactos ambientais”, “mitigação” e “inovação tecnológica” permitindo uma leitura integrada e comparativa dos resultados.

A análise dos dados foi conduzida de forma descritiva e interpretativa, buscando estabelecer relações entre a literatura científica, as práticas produtivas e os impactos ambientais, sociais e econômicos identificados. Essa abordagem metodológica possibilitou construir uma síntese integradora sobre os desafios e oportunidades de transformação da cadeia têxtil rumo a um modelo mais sustentável, circular e alinhado aos princípios da bioeconomia, contribuindo para o debate acadêmico e para a formulação de estratégias aplicáveis ao setor.

3 ESTRUTURA E CARACTERIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA TÊXTIL

Esta seção apresenta a cadeia produtiva têxtil, detalhando desde a origem das matérias-primas até a confecção e acabamento das peças. São abordados a história do algodão, as fibras utilizadas e a evolução do *denim*, bem como os processos de fiação, tecelagem, tingimento, acabamento, confecção e lavagem final. A descrição desses elementos permite compreender os principais pontos críticos em termos de consumo de recursos e geração de resíduos, servindo de base para a aplicação da ACV no capítulo seguinte.

3.1 HISTÓRIA DA INDÚSTRIA TÊXTIL: FOCO EM TÊXTEIS DE ALGODÃO

A produção de têxteis de algodão é uma das atividades industriais mais antigas da humanidade, com vestígios de tecidos datados de 3200 a.C. encontrados no vale do rio Indo, na atual Índia. Durante os séculos seguintes, a técnica de fiação e tecelagem de algodão se espalhou para outras regiões, incluindo o Egito e a China, consolidando-se como uma das principais fontes de vestuário e tecidos utilitários (Consta; Bueno, 2004; Pezzolo, 2019). Inicialmente, o algodão era considerado uma raridade botânica, mas seu uso expandiu-se gradualmente, tornando-se um material de ampla circulação, conectando diferentes culturas e classes sociais em um comércio global (Beckert, 2014).

Entre os séculos XII e XVIII, houve uma expansão significativa do cultivo e processamento do algodão, substituindo fibras como cânhamo, linho e rami, especialmente na Ásia e no Oriente Médio. Os árabes desempenharam um papel crucial na disseminação do conhecimento sobre o cultivo e a manufatura do algodão para a Europa, onde a demanda por tecidos aumentava constantemente (Pezzolo, 2019).

A Revolução Industrial, iniciada na segunda metade do século XVIII, trouxe inovações tecnológicas que transformaram a indústria têxtil, com a mecanização da fiação e do tear a vapor, permitindo a produção em larga escala. Essa transformação consolidou o algodão como a primeira *commodity* global do mundo, devido às escalas de produção, consumo e exportação, maiores do que qualquer outra manufatura até então (Ferreira, 2022; Beckert, 2014).

No Brasil, o cultivo do algodão foi incentivado a partir de 1750, durante a administração do Marquês de Pombal, visando reduzir a dependência dos tecidos importados e estimular a economia colonial (Fausto, 2022). O Ciclo do Algodão, entre o final do século XVIII e início do XIX, destacou regiões como Maranhão e Pará na produção e exportação da

fibra, contribuindo para o desenvolvimento econômico e urbanização do país (Oliveira, 2021).

Além disso, a crescente demanda global por algodão e tecidos levou a uma constante inovação e modernização das técnicas de produção, tornando o algodão parte de produções em massa em diversos setores e reafirmando sua posição como uma das fibras mais utilizadas na indústria têxtil (Beckert, 2014; Pezzolo, 2019).

O cultivo do algodão utiliza uma quantidade desproporcional de produtos químicos, correspondendo a cerca de 25% dos inseticidas usados no mundo (Chen *et al.*, 2021). Cerca de 12% do algodão é utilizado na confecção de peças jeans, de acordo com o estudo da Cotton Incorporation (Kininmonth, 2012).

3.2 FIBRAS USADAS NA PRODUÇÃO DE TECIDOS

A fibra têxtil é definida como uma unidade de matéria com elevada proporção entre comprimento e finura, cuja flexibilidade permite sua transformação em fio (Pereira, 2013). Dependendo da matéria-prima utilizada, as fibras podem ser classificadas em naturais e não naturais, sendo estas últimas subdivididas em artificiais e sintéticas. As fibras naturais têm origem vegetal, animal ou mineral (Alcântara; Daltin, 1996).

Dentre as de origem vegetal destacam-se o algodão, linho, rami e sisal. O algodão é a fibra mais utilizada na indústria têxtil brasileira, composta majoritariamente por celulose, e apresenta características como biodegradabilidade, baixo custo, boa resistência a solventes e temperatura, além de ser atóxica.

As de origem animal incluem a lã e a seda, compostas por proteínas como queratina e sericina. Nas de origem mineral tem-se o amianto, atualmente pouco utilizado devido a questões de saúde, composto por silicato hidratado de ferro.

As fibras naturais apresentam vantagens ambientais significativas, pois são biodegradáveis e de baixo impacto ecológico (Bezerra, 2014).

Com a crescente demanda global por produtos têxteis, especialmente a partir da década de 1990, as fibras naturais tornaram-se insuficientes para suprir o consumo mundial, levando ao desenvolvimento de fibras artificiais e sintéticas (Bezerra, 2014). As de fibras artificiais são obtidas a partir de matérias-primas naturais, como a celulose, mas processadas quimicamente para gerar fios, como a viscose e o acetato. As de fibras sintéticas são produzidas a partir da indústria petroquímica, incluem poliéster, poliamida (*nylon*), acrílico e elastano. Estas fibras apresentam durabilidade e resistência superiores, porém maior impacto ambiental, pois apresentam longo tempo de degradação e desafios de reciclagem (Oliveira,

2010).

No Brasil, a maior parte das fibras utilizadas são, em ordem decrescente: algodão, poliéster, viscose e poliamida. Muitos tecidos são produzidos a partir da combinação de duas ou mais fibras, visando características específicas como elasticidade, resistência e conforto (Pereira, 2013). Apesar das limitações em materiais, o Brasil ocupa posição de destaque no cenário têxtil global. O país é o quinto maior produtor mundial de produtos têxteis e vestuário, o quarto maior produtor de *denim*, e figura como o terceiro maior exportador de algodão (Fialho, 2024). Em 2022, a produção nacional de algodão atingiu cerca de 2,83 milhões de toneladas, representando um aumento de 469 mil toneladas em relação à safra 2020/2021, impulsionada por condições climáticas favoráveis e preços atrativos, com ampliação da área plantada em aproximadamente 230 mil hectares. Os principais estados produtores são Mato Grosso, Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul e Maranhão (Coelho, 2022; CONAB, 2022).

O processamento têxtil envolve fiação, tecelagem e beneficiamento (Pereira, 2013). Na fiação, as fibras são abertas, limpas, alinhadas e torcidas para formar fios cardados, penteados, *open end* ou jato de ar. Na tecelagem, os fios são entrelaçados em padrões planos, de malha ou não-tecido, criando o tecido final. O beneficiamento aprimora as propriedades físico-químicas do substrato, incluindo tingimento e estamparia. Essas etapas são responsáveis por elevado consumo de água e geração de efluentes: estima-se entre 50 e 100 L de efluente por quilo de tecido, que, se não tratados adequadamente, podem causar danos ambientais significativos (Braile; Cavalcanti, 1993; Oliveira, 2010).

A compreensão dessas características das fibras e do processo produtivo é essencial para avaliar os impactos ambientais da indústria têxtil e propor práticas sustentáveis, como reciclagem de fibras e economia circular (Muthu, 2014; Gautam, Priya; Priya, 2024).

3.3 EVOLUÇÃO HISTÓRICA E CADEIA PRODUTIVA DO *DENIM*

A compreensão da história do *denim* exige a distinção clara entre os termos *jeans*, *denim* e índigo, que, embora relacionados, possuem significados distintos. O termo *jeans* refere-se originalmente à peça de vestuário criada por Levi Strauss, confeccionada em tecido de algodão e tingida com corante índigo. O modelo clássico, conhecido como *five pockets*, caracteriza-se pelos cinco bolsos e consolidou-se como um ícone da moda mundial. Já *denim* é o tecido de sarja de algodão utilizado na confecção dessas peças, originalmente de peso elevado, cerca de 14 oz por metro quadrado, garantindo resistência e durabilidade (Catoira,

2009; Oliveira, 2008). Como destaca Oliveira (2008), o *jeans* ultrapassa a ideia de um simples tecido, configurando-se como um conceito de estilo que engloba diferentes modelagens, texturas e usos.

O corante índigo teve um papel crucial na construção da identidade visual do *denim*. Conforme Catoira (2006), ele era extraído de plantas como *Indigofera* e *Isatis tinctoria* e já constava em registros alfandegários de Gênova desde 1140. A introdução da versão sintética do corante, desenvolvida pela empresa química alemã Badische Anilin- & Soda-Fabrik (BASF) em 1897, reduziu custos e ampliou o acesso ao produto, acelerando a expansão da indústria. A substituição do índigo natural pelo sintético permitiu a produção em larga escala, consolidando o *denim* como uma das bases da indústria têxtil moderna (Catoira, 2006; Silva, 2014).

A origem do *denim* remonta ao final do século XVIII, na cidade de Nîmes, no sul da França, quando tecelões locais tentaram reproduzir um tecido resistente proveniente de Gênova. O resultado foi um novo tecido de sarja robusto, denominado *serge de Nîmes*, que acabou abreviado para *denim*. Inicialmente, esse material era utilizado na confecção de roupas de trabalho, devido à sua resistência e durabilidade (Kwok, *et al.*, 2006). O tecido ganhou projeção internacional no século XIX, especialmente durante a corrida do ouro na Califórnia. Em 1853, Levi Strauss, em parceria com Jacob Davis, patenteou o modelo de calça reforçada com rebites de cobre, criando assim o primeiro *jeans*, uma peça ideal para mineradores, resistentes ao uso intenso.

A evolução tecnológica do *denim* se intensificou a partir das décadas de 1960 e 1970, com a inserção de novos filamentos, como poliéster e elastano, que trouxeram mais conforto, flexibilidade e melhor acabamento (Silva, 2014). Essa inovação permitiu diversificar os usos do tecido, adaptando-o a diferentes tendências e públicos. Ao longo de mais de um século e meio, o *denim* consolidou-se como um tecido democrático, funcional e de fácil manutenção, sendo amplamente utilizado independentemente de classe social, idade ou gênero (Catoira, 2009; Oliveira, 2008). Atualmente, o *denim* é um dos tecidos mais populares e versáteis do mundo da moda, acompanhando transformações culturais, sociais e tecnológicas e mantendo sua relevância no setor têxtil global (Hethorn; Ulasewicz, 2018; Periyasamy, 2020; Periyasamy; Periyasami, 2023; Periyasamy, Wiener; Militky, 2017; Silva, 2014).

3.3.1 Linha de Produção

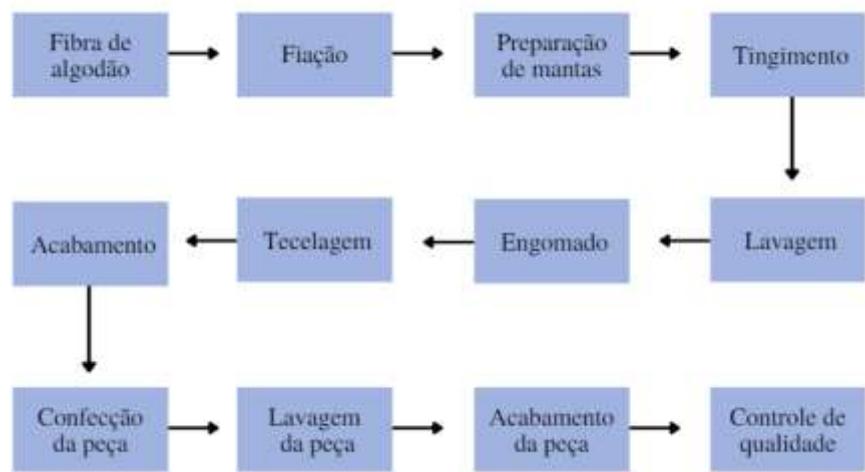
Atualmente, o *denim* é reconhecido como um dos tecidos mais versáteis e amplamente

utilizados no mundo. Sua presença no vestuário contemporâneo é resultado de um longo processo histórico de transformação produtiva e tecnológica. Ao longo das décadas, a indústria têxtil desenvolveu métodos altamente estruturados para a fabricação do tecido, envolvendo múltiplas etapas que podem ocorrer de forma integrada ou distribuída geograficamente. De acordo com Confederação Nacional da Indústria (2017), corroborando com a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção (2023), a cadeia produtiva do setor é caracterizada por um elevado grau de complexidade e interdependência entre fornecedores, fabricantes de tecidos e confecções.

A produção do *denim* envolve etapas interligadas que, em muitos casos, são realizadas em diferentes países, compondo cadeias globais de valor. Segundo Ellen MacArthur Foundation (2017), cerca de 80% da produção mundial de *denim* é concentrada em poucos polos industriais, especialmente na Ásia, com distribuição de etapas como fiação, tecelagem, tingimento e confecção em locais distintos. Essa fragmentação permite ganhos de escala, mas também exige um sistema logístico eficiente, já que o tecido ou a peça em produção pode percorrer milhares de quilômetros antes de chegar ao consumidor final.

De forma simplificada, o fluxo produtivo de uma peça *jeans* pode ser representado por um fluxograma (Figura 1).

Figura 1 – Fluxo produtivo de uma peça *jeans*



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Ricci *et al.* (2012).

O fluxo produtivo tradicional da cadeia têxtil, inicia-se com a preparação da fibra de algodão, seguida pelas etapas de fiação, preparação de mantas e tingimento. Em seguida, ocorre a lavagem, o engomado e a tecelagem, que constituem etapas intermediárias de grande

relevância no consumo de recursos e geração de resíduos. Após a fase de acabamento, a peça passa pela confeção, lavagem final, acabamento final e controle de qualidade, concluindo o ciclo linear de produção (Textile Exchange, 2021).

O maior consumo de energia, água e produtos químicos ocorre nas etapas de tingimento, lavagem e acabamento, consideradas pontos críticos ambientais. Essas fases demandam grandes volumes de água e intensivo uso de insumos químicos, contribuindo significativamente para a poluição hídrica e geração de efluentes (Holkar *et al.*, 2016; Hasanbeigi; Price, 2012). Além disso, as perdas de material ao longo do processo, como aparas e resíduos de fibras, geralmente não são reinseridas na cadeia produtiva, o que caracteriza um modelo linear e de baixa circularidade (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Para que a indústria têxtil avance rumo a um sistema de economia circular, etapas como tingimento, lavagem e acabamento devem ser redesenhas, incorporando tecnologias limpas, reaproveitamento de água e reciclagem de resíduos têxteis. Essas ações contribuem para minimizar impactos ambientais, aumentar a eficiência dos processos e prolongar a vida útil dos materiais (Bocken *et al.*, 2016; Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Cada uma dessas etapas engloba subprocessos específicos, que variam de acordo com o nível tecnológico e a capacidade produtiva da fábrica. Por exemplo, na etapa de tingimento, há diferentes métodos, como o *rope dyeing* e o *slasher dyeing*, que afetam diretamente a qualidade final do tecido (Kiron, 2022). Já nas etapas de acabamento e lavanderia, técnicas de beneficiamento com menor impacto ambiental, como o uso de ozônio e *laser*, têm ganhado espaço na busca por maior sustentabilidade (Hethorn; Ulasewicz, 2018; Ellen Macarthur Foundation, 2017).

Assim, a linha de produção do *denim* não se limita a um único processo industrial, mas a uma cadeia produtiva global, articulada e dinâmica, que combina tecnologia, logística, *design* e sustentabilidade. Com isso, o *jeans* deixa de ser apenas uma peça de vestuário para se tornar um produto estratégico, inserido em uma rede produtiva complexa, com desafios e oportunidades relacionados à inovação e à responsabilidade socioambiental (Beckert, 2014; Hethorn; Ulasewicz, 2018).

3.3.2 Cultivo de Algodão

O cultivo do algodão no Brasil ganhou força a partir da década de 1990, quando produtores, especialmente na região Centro-Oeste, investiram em sistemas de produção mecanizados e altamente tecnificados, diferentemente do modelo de agricultura familiar

predominante até então. A modernização do cultivo foi impulsionada pelo aumento da demanda interna e externa, bem como por políticas de incentivo à produção agrícola em larga escala (Companhia Nacional de Abastecimento, 2022). Com a adoção de práticas mais eficientes, o país consolidou-se como um dos maiores produtores e exportadores mundiais de algodão, integrando cadeias globais da indústria têxtil.

Atualmente, cerca de 60% do algodão produzido no Brasil corresponde à segunda safra, sendo cultivado após a colheita de outras culturas, o que favorece a incorporação de matéria orgânica no solo e otimiza o uso das áreas agrícolas. Além disso, aproximadamente 8% da produção é irrigada, percentual inferior à média global, demonstrando a elevada produtividade mesmo com baixa dependência de irrigação, segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Algodão (ABRAPA, 2023). O país ocupa atualmente a 4^a posição mundial em produção e a 2^a em exportação de algodão, com estimativa de mais de 3 milhões de toneladas de pluma bruta colhida na safra 2022/2023 (ABRAPA, 2023; United States Department of Agriculture, 2023).

O setor algodoeiro brasileiro também tem se destacado no campo da sustentabilidade. Programas como o Algodão Brasileiro Responsável (ABR) e parcerias com a Better Cotton Initiative (BCI) certificam propriedades que cumprem critérios rigorosos em três pilares: econômico, social e ambiental. Cerca de 84% da produção nacional possui certificação socioambiental, assegurando rastreabilidade e boas práticas agrícolas (ABRAPA, 2023). Esse modelo inclui o controle rigoroso do uso de defensivos, gestão hídrica eficiente, boas condições de trabalho e inovação tecnológica no campo.

A produção de algodão também apresenta desafios significativos, especialmente relacionados ao consumo de água e ao impacto ambiental. Estudos da World Wide Fund for Nature (WWF) indicam que, em média, são necessários até 20.000 litros de água para a produção de 1 kg de algodão convencional, incluindo irrigação e processamento, embora métodos mais modernos e cultivos em regiões de sequeiro reduzam esse número (WWF, 2023). Além das questões hídricas e ambientais já reconhecidas, a relevância socioeconômica do algodão é expressiva, sendo considerado a cultura não alimentar mais amplamente cultivada e rentável do mundo. Segundo estimativas, sua produção garante sustento direto a cerca de 100 milhões de famílias distribuídas em 75 países, em sua maioria localizados em regiões de baixa renda, e envolve, de forma indireta, outras 350 milhões de pessoas em atividades como colheita, transporte, descarrocamento, enfardamento e armazenamento (Voora *et al.* 2023). Trata-se, portanto, de um setor estratégico para a indústria têxtil global, responsável por empregar aproximadamente 25 milhões de trabalhadores, já que cerca de

metade de todos os têxteis produzidos no mundo têm o algodão como matéria-prima.

Além disso, cresce a relevância do algodão orgânico, cultivado sem uso de transgênicos ou pesticidas sintéticos, priorizando fertilizantes naturais, controle biológico de pragas e rotação de culturas para preservação da fertilidade do solo (WWF, 2023). Esse tipo de produção, embora represente parcela pequena do mercado mundial, tem ganhado espaço no Brasil, alinhando-se às demandas de consumidores e marcas por cadeias têxteis mais sustentáveis e transparentes (ABRAPA, 2023).

3.3.4 Fiação

Após o cultivo e beneficiamento do algodão, as fibras seguem para as indústrias de fiação, etapa responsável por transformar a pluma em fio. Esse processo envolve diversas operações técnicas interligadas, abertura, limpeza, paralelização, estiragem e torção, que visam melhorar a qualidade e a regularidade das fibras para posterior transformação em tecido (ABIT, 2023). A etapa inicial de abertura e limpeza remove impurezas e descompacta os fardos de algodão, enquanto a cardagem e a penteação alinham as fibras e reduzem defeitos, permitindo maior uniformidade ao fio (Camargo, 2019; Santiago, 2023; Silva, 2023).

A partir da década de 1990, a indústria têxtil brasileira passou por forte modernização, incorporando sistemas automatizados de alta *performance* na fiação. A tecnologia de fiação a rotor (*open-end*) passou a predominar, reduzindo etapas intermediárias da fiação convencional a anel e permitindo maior produtividade com menor custo operacional (Gomes *et al.*, 2007). Essa transição tecnológica também favoreceu a integração de sistemas de transporte automatizado de bobinas, controle eletrônico de qualidade e monitoramento em tempo real da produção.

Os fios *open-end* apresentam características adequadas para tecidos *denim*, como boa resistência, uniformidade e custo competitivo, sendo amplamente utilizados na cadeia produtiva do *jeanswear*. Por outro lado, a fiação a anel ainda é empregada quando se busca fios mais finos, com melhor resistência e toque mais suave, características valorizadas em segmentos premium. O avanço tecnológico tem permitido também maior eficiência energética e redução de desperdícios, alinhando o setor aos princípios de sustentabilidade industrial (Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção, 2023; Textile Exchange, 2021).

3.3.5 Tingimento

O tingimento é uma etapa estratégica na cadeia de produção do *denim*, sendo responsável pela coloração característica dos fios de urdume. O corante predominante é o índigo *blue*, originalmente extraído de plantas do gênero *Indigofera* e atualmente produzido majoritariamente de forma sintética (Catoira, 2006). Apesar de apresentar características técnicas que podem limitar sua solubilidade e qualidade em comparação a outros corantes, o índigo é amplamente empregado no setor têxtil devido ao efeito visual característico de “desgaste” que proporciona ao *denim*, atributo valorizado no *design* de moda. O processo químico de tingimento envolve reações de oxidação e redução, nas quais o corante, insolúvel em água em sua forma original, precisa ser convertido em uma forma solúvel por meio da adição de álcalis e agentes redutores antes de ser aplicado aos fios da urdidura (Periyasamy; Periyasami, 2023).

Estima-se que a indústria global de *denim* utilize cerca de 50 a 60 mil toneladas de índigo sintético por ano (Hsu *et al.*, 2018; Periyasamy; Periyasami, 2023), demandando grandes volumes de substâncias auxiliares para viabilizar o tingimento, aproximadamente 84,5 mil toneladas de hidrossulfito de sódio e 53,5 mil toneladas de soda cáustica anualmente (Bechtold; Pham, 2023). Como a fixação completa do corante não é possível, uma parte significativa permanece não aderida às fibras e acaba sendo descartada juntamente com os efluentes industriais. Esse descarte contribui para a turbidez da água e para o desequilíbrio ecológico dos ecossistemas aquáticos, além de representar um risco ambiental considerável, já que muitos desses resíduos apresentam propriedades tóxicas, mutagênicas ou potencialmente cancerígenas (Zaharia *et al.*, 2009).

Durante a etapa de produção do *denim*, os efluentes gerados apresentam características típicas de elevada carga poluidora, incluindo pH elevado, alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), além de concentrações significativas de sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos suspensos (SS), turbidez, cloretos, sulfatos e fenóis. Esses contaminantes exercem impactos ambientais expressivos, sobretudo sobre atividades agrícolas e industriais, comprometendo a qualidade da água e dificultando seu reaproveitamento em diferentes usos produtivos (Periyasamy 2020; Periyasamy; Wiener, Militky, 2017).

Além dos resíduos gerados nas etapas industriais, o ciclo de vida do *denim* também contribui para a poluição durante a lavagem doméstica das peças. Nessa fase, ocorre a liberação de microfibras no efluente doméstico. Essas microfibras podem conter diversos

contaminantes resultantes do processo de tingimento e acabamento, incluindo sais, surfactantes, metais iônicos e seus complexos, formaldeído, compostos orgânicos tóxicos, biocidas, detergentes, emulsificantes e dispersantes, ampliando os riscos ambientais associados ao uso desse tipo de tecido (Athey *et al.*, 2020; Periyasamy, 2021; Periyasamy; Tehrani-Bagha, 2022).

Existem três principais métodos de tingimento aplicados ao *denim*: índigo, *bottoming* e *topping*. No método índigo apenas a superfície do fio é tingida, mantendo o centro sem coloração. No *bottoming*, uma base de cor (geralmente enxofre) é aplicada antes do índigo, permitindo tonalidades mais escuras e profundas. No *topping*, a base é índigo e o topo recebe uma pequena quantidade de corante enxofre, criando variações de tonalidade e profundidade (Transformers Foundation, 2021).

Dois tipos principais de maquinário são empregados: *rope dyeing* (em corda) e *slasher dyeing* (em multicaixas). O *rope dyeing* proporciona tingimento mais uniforme, com as cordas compostas por 300 a 400 fios passando por múltiplos banhos de impregnação e oxidação. Já o *slasher dyeing* permite maior flexibilidade tonal e custos reduzidos, sendo amplamente utilizado por indústrias de médio porte. O processo inclui etapas de pré-limpeza, impregnação, ciclos de tingimento com hidrossulfito de sódio e soda cáustica, oxidação, fixação, secagem e engomagem (Kiron, 2022).

Recentemente, a indústria tem incorporado tecnologias mais limpas, como tingimento com espuma, ozônio ou laser, visando reduzir drasticamente o consumo de água e produtos químicos, em linha com os princípios de produção mais sustentável (Sustainable Apparel Coalition, 2022; Textile Exchange, 2021).

3.3.6 Tecelagem

A tecelagem é a etapa em que os fios são entrelaçados para formar o tecido *denim*, combinando urdume (fios longitudinais) e trama (fios transversais). Historicamente, a produção de *denim* se iniciou em teares manuais com lançadeira, originando o tradicional *selvedge denim*, caracterizado pelas bordas fechadas e largura reduzida de tecido, cerca de 92 cm (Periyasamy, 2020; Periyasamy; Periyasami, 2023; Periyasamy, Wiener; Militky, 2017).

Com a expansão da demanda no pós-guerra, o setor adotou teares automáticos de maior largura e produtividade, como os teares de projétil desenvolvidos pela Sulzer, permitindo mais de 1000 inserções de trama por minuto e tecidos de largura ampliada.

Existem quatro estruturas de tecelagem mais comuns no *denim*: Tela (1x1), Sarja 2x1,

Sarja 3x1 e Cetim 4x1.¹ A estrutura Sarja 3×1 é uma das construções têxteis mais clássicas e difundidas no mundo, especialmente na produção de tecidos resistentes e versáteis, como o *denim*. Nesse padrão, cada fio de trama passa por cima de três fios de urdume e por baixo de um, criando um entrelaçamento oblíquo que resulta no tradicional desenho em diagonal na superfície do tecido (Kadolph; Langford, 2010).

Essa diagonal pode se inclinar para duas direções: 1) Sarja “S” – quando a inclinação segue da esquerda para a direita (formando um traço que lembra a letra S); 2) Sarja “Z” – quando a inclinação ocorre no sentido oposto, da direita para a esquerda (lembrando a letra Z) (Behera, Hari, 2010).

A escolha entre a sarja S ou Z não é apenas estética: ela também influencia o toque, a elasticidade e o caimento do tecido. Tecidos com diagonal S, por exemplo, tendem a apresentar um toque mais macio e flexível, enquanto os com diagonal Z oferecem maior estrutura e rigidez, sendo muito comuns em calças jeans tradicionais (Behera, Hari, 2010).

No caso do *denim*, a sarja 3×1 é o padrão mais usado por proporcionar alta resistência ao desgaste, graças à maior predominância de urdume sobre a trama; textura visual marcante, com a diagonal bem definida; e durabilidade e conforto, características que ajudaram a popularizar o *jeans* em todo o mundo.

Segundo Kadolph e Langford (2010) e Colchester (2013), a estrutura sarja oferece excelente desempenho mecânico e boa recuperação de forma, além de possibilitar variações de efeitos visuais por meio de diferentes inclinações e densidades de fios. Essa versatilidade explica por que a sarja 3×1 é amplamente empregada não apenas no *denim*, mas também em outros tecidos destinados à confecção de uniformes, calças de alfaiataria, casacos e tecidos técnicos.

O uso de fibras com elastano passou a ser incorporado nos últimos anos, especialmente nas estruturas de cetim, aumentando o conforto e a elasticidade das peças. Além disso, os avanços em automação e controle eletrônico dos teares permitem maior precisão e eficiência produtiva, reduzindo perdas e consumo energético (International Textile Manufacturers Federation (ITMF), 2022).

¹ Nas últimas décadas, houve uma forte tendência da indústria do *denim* em incorporar fibras elásticas, especialmente elastano, para agregar conforto, elasticidade e melhor ajuste ao corpo. Essa aplicação é comum tanto em sarja quanto em cetim (*satin denim*), que é usado para criar tecidos mais leves, lisos e com brilho, geralmente voltados para o público feminino ou peças premium, utilizados para calças *skinny* e *jeggings*, pois proporcionam maior recuperação elástica e conforto (Haque *et al.*, 2023; Rahim; Rahman; Uddin, 2023). Essa utilização é resultado do desenvolvimento da indústria têxtil, que passou de teares mecânicos tradicionais para teares eletrônicos e automáticos (*air jet*, *rapier*, *projectile*) com controle digital, permitindo maior precisão, redução de defeitos, melhor aproveitamento de matéria-prima e menor consumo energético (Khiani; Peerzada; Abbasi, 2016). A automação também facilitou a incorporação de diferentes estruturas e misturas de fibras (como elastano e algodão) com alta regularidade (Haque *et al.*, 2023).

A escolha do tipo de tear e da estrutura de tecelagem influencia diretamente a qualidade final do tecido, sua gramatura, resistência e comportamento nas etapas subsequentes, como acabamento, confecção e lavanderia. Assim, a tecelagem representa um elo estratégico na cadeia de valor do *denim*, com impacto técnico e estético significativo no produto final.

3.3.7 Acabamento

Após a etapa de tecelagem, os tecidos *denim* passam por um conjunto de operações conhecido como acabamento têxtil, cujo objetivo é estabilizar dimensionalmente o tecido, melhorar seu toque e preparar sua superfície para a confecção. O acabamento é uma etapa fundamental para garantir que as propriedades físicas e visuais do tecido permaneçam estáveis após processos subsequentes, como costura e lavagem (ABIT, 2023).

Entre as principais operações realizadas nesta etapa estão:

- Chamuscagem (*singeing*): remoção de fibras superficiais soltas por meio da exposição controlada à chama ou calor;
- Correção de trama (*weft straightening*): alinhamento dos fios de trama e fixação dimensional;
- Secagem: realizada em equipamento chamado rama, garantindo uniformidade e remoção de umidade;
- Sanforização (*sanfor*): processo mecânico que assegura a estabilidade dimensional do tecido, evitando encolhimentos posteriores.
- Palmer: operação complementar de ajuste final, responsável por melhorar o caiimento e a estabilidade dimensional (ITMF, 2022).

O acabamento também pode envolver a aplicação de amaciantes, ceras e produtos auxiliares para melhorar a resistência do tecido ao manuseio e aos processos de costura. Além disso, tecnologias mais sustentáveis, como secagem por infravermelho e controle eletrônico de temperatura, vêm sendo incorporadas para reduzir o consumo energético e aumentar a eficiência produtiva (Sustainable Apparel Coalition, 2022).

3.3.8 Confecção

A confecção representa a etapa de transformação do tecido *denim* em produtos finais como calças, jaquetas, camisas e outros artigos de vestuário. Trata-se de um processo altamente integrado, que combina criação, modelagem, corte, costura e acabamentos. Nessa fase, a criatividade do *design* se alia à eficiência produtiva para atender a diferentes segmentos de mercado (Kwok *et al.*, 2006).

O processo inicia-se com o desenvolvimento da peça piloto, na qual são testadas modelagens, caimento e processos de costura. Uma vez aprovada, são elaborados moldes e realizado o encaixe sobre o tecido para otimizar o consumo e reduzir desperdícios. A etapa de corte é particularmente relevante, pois é responsável por grande parte dos resíduos sólidos gerados no setor têxtil. Tecnologias de corte automatizado² vêm sendo incorporadas para minimizar perdas e aumentar a precisão (Khiani, Peerzada, Abbasi, 2023; Haque *et al.* 2023; Sustainable Apparel Coalition, 2022).

As peças são então costuradas em linha de produção, passando por diversas estações que executam operações específicas (bainha, cós, zíper, bolsos, rebites etc.). O número de peças e etapas pode variar de acordo com a complexidade do modelo, podendo chegar a mais de 30 operações em peças mais elaboradas, como jaquetas *jeans*. A etapa final inclui a revisão de qualidade e a preparação para a lavanderia.

O setor de confecção é intensivo em mão de obra, com forte presença feminina, especialmente no Brasil, e desempenha papel socioeconômico relevante. Investimentos em automação, ergonomia e digitalização de processos vêm ampliando a produtividade e reduzindo impactos ambientais e sociais (ABIT, 2023).

3.3.9 Lavagem e Acabamento Final

A etapa de lavanderia e acabamento final é responsável por dar à peça *denim* sua

² A indústria têxtil vem incorporando tecnologias de corte automatizado que combinam precisão, redução de desperdício de tecido e ganho de produtividade. Entre as principais soluções empregadas destacam-se: Sistemas *Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing* (CAD/CAM), utilizados para digitalizar moldes, realizar encaixes automáticos (*marker making*) e transmitir dados diretamente às máquinas de corte, otimizando o uso do tecido e reduzindo falhas humanas (Burke; Sinclair, 2015); Corte por faca automática (*Automatic Cutting Machine*), com lâminas controladas eletronicamente, permitindo cortes em múltiplas camadas de tecido com alta velocidade e precisão, incluindo detecção automática de falhas ou desalinhamentos (Smithers, 2025); Corte a *laser*, utilizado especialmente em tecidos de *denim* com elastano ou acabamentos diferenciados, oferecendo bordas seladas e cortes extremamente detalhados, sem necessidade de afiação mecânica (Nayak; Padhye, 2016); Corte por jato d'água (*Water Jet Cutting*), menos comum no *denim*, mostra-se eficiente para tecidos sensíveis ao calor, pois evita queima ou alteração da estrutura das fibras (ITMF, 2022); por fim, a integração com sistemas *Enterprise Resource Planning* (ERP) e *Internet of Things* (IoT) possibilitando rastrear dados de produção em tempo real, otimizando custos e tempos de ciclo (ITMF, 2022).

aparência definitiva, textura, suavidade e efeitos visuais desejados, como desbotamento, envelhecimento, puídos e lavagens diferenciadas. Tradicionalmente, esses efeitos são obtidos por meio de processos mecânicos e químicos, mas nos últimos anos a indústria vem incorporando métodos mais sustentáveis para reduzir impactos ambientais (Textile Exchange, 2021).

O processo convencional envolve as seguintes etapas:

- Lavagem mecânica (*stone wash*): uso de pedras-pomes em lavadoras industriais para desgaste controlado da superfície do tecido;
- Centrifugação e secagem: remoção de excesso de água e estabilização dimensional; e
- Amaciamento: aplicação de produtos químicos ou mecânicos para melhorar o toque e conforto da peça.

Métodos inovadores têm ganhado espaço, como o uso de *laser*, que cria efeitos de desgaste e puídos sem uso de água; ozônio, que oxida a superfície do tecido dispensando produtos químicos agressivos; e sistemas *enclosed* de reaproveitamento de água e produtos químicos, reduzindo drasticamente o consumo de recursos (Sustainable Apparel Coalition, 2022).

Além disso, certificações internacionais vêm incentivando práticas de produção mais responsáveis nessa etapa da cadeia. Normas como o *Higg Index* e programas de rastreabilidade ajudam marcas e fabricantes a monitorar e reduzir a pegada hídrica e de carbono associada à lavagem do *denim* (Sustainable Apparel Coalition, 2022; Transformers Foundation, 2021). A consolidação dessas práticas de controle e rastreabilidade ocorre em paralelo a um processo produtivo que, ao longo do tempo, manteve características estruturais tradicionais, como o uso predominante da sarja 3×1.

3.4 IMPACTOS DOS PROCESSOS

A cadeia produtiva do *denim* consolidou-se como uma das mais estruturadas e globalizadas da indústria têxtil, reunindo etapas intensivas em recursos e com forte interdependência entre processos. Da produção da fibra de algodão à confecção final, cada fase, fiação, tingimento, tecelagem, acabamento, confecção e lavagem, demanda volumes significativos de água, energia e insumos químicos, além de gerar resíduos sólidos e efluentes industriais.

Estudo de Marcial (2018) mostra que as etapas de cultivo do algodão e de beneficiamento inicial concentram grande parte do consumo de água e energia, além do uso

intensivo de pesticidas e fertilizantes. Já nas etapas intermediárias, especialmente no tingimento com índigo e na lavagem industrial, há elevado consumo de água, uso intensivo de corantes e produtos químicos auxiliares, bem como geração de efluentes de difícil tratamento (Hasanbeigi; Price, 2015). Esses impactos ambientais não ocorrem de forma isolada, mas se somam ao longo da cadeia, resultando em uma pegada ecológica considerável associada ao ciclo de vida do *jeans*.

Ao mesmo tempo, a evolução tecnológica e a incorporação de práticas mais limpas em etapas críticas, como tingimento e lavanderia, têm impulsionado transformações importantes na busca por modelos produtivos mais eficientes e circulares. A análise integrada dessas etapas permite não apenas quantificar impactos, mas também propor melhorias direcionadas, como a substituição de corantes por versões de baixo impacto, reuso de água de processo, otimização de banhos de tingimento, redução de etapas redundantes de lavagem e incorporação de tecnologias de baixo consumo energético. Nesse contexto, ferramentas metodológicas robustas tornam-se fundamentais para compreender de forma sistêmica os efeitos ambientais dessas operações. A ACV surge, assim, como um instrumento estratégico para mapear, quantificar e comparar os impactos gerados em cada estágio produtivo, oferecendo subsídios para decisões mais responsáveis e alinhadas a metas globais de sustentabilidade no setor têxtil.

4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS: ECONOMIA CIRCULAR E BIOECONOMIA

A ACV, a economia circular e a bioeconomia são conceitos interligados que se complementam, e juntos formam a base de estratégias sustentáveis voltadas para reduzir impactos ambientais, otimizar o uso de recursos e promover modelos econômicos regenerativos. Enquanto a ACV fornece a base técnica e analítica para identificar oportunidades de redução de impactos ambientais; a economia circular orienta o redesenho dos sistemas produtivos para promover eficiência e regeneração; e a bioeconomia fornece insumos renováveis e estratégias para substituição de recursos fósseis, fortalecendo cadeias produtivas mais sustentáveis e resilientes. A articulação desses três conceitos representa um caminho estratégico para a transição a uma economia de baixo carbono e para a consolidação de modelos produtivos sustentáveis.

4.1 ACV

O debate em torno da sustentabilidade ganhou relevância mundial a partir da segunda metade do século XX, com destaque para a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo em 1972, que marcou o início de uma agenda ambiental global (United Nations, 1973). Esse conceito foi consolidado com o *Our Common Future*, publicado pela World Commission on Environment and Development em 1987, e reafirmado durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), quando se consolidou o termo “desenvolvimento sustentável” como eixo central das políticas globais (United Nations, 1993).

O conceito de sustentabilidade refere-se a um modelo de desenvolvimento que busca satisfazer as necessidades atuais sem colocar em risco os recursos e condições necessários para que as próximas gerações possam atender às suas próprias demandas. Isso envolve a gestão integrada de recursos naturais, energia, matérias-primas, produção, consumo, descarte, reciclagem e responsabilidade socioambiental (United Nations, 1973; WWF-Brasil, 2023; World Commission on Environment and Development, 1987).

O processo de industrialização acelerado no pós-Segunda Guerra Mundial, com forte inserção tecnológica durante a Terceira Revolução Industrial, contribuiu para aumentar a consciência ambiental e a percepção dos impactos associados aos sistemas produtivos (Guinée, 2002). Nesse contexto, surge a técnica de ACV, desenvolvida inicialmente nos anos

1960, em um cenário de expansão do consumo e crescente pressão por maior transparência na cadeia produtiva.

A disseminação da metodologia de ACV ganhou impulso na América do Norte a partir de 1990, em grande parte graças ao incentivo da Sociedade Internacional para a Química e Toxicologia Ambiental (SETAC). Entretanto, os primeiros estudos nesse campo remontam a 1969, quando a Coca-Cola encomendou ao Midwest Research Institute uma análise comparativa de diferentes tipos de embalagens de refrigerantes, buscando identificar aquelas que apresentavam os menores índices de emissões ambientais (Santos , 2009).

A partir dessa iniciativa pioneira, empresas começaram a adotar metodologias padronizadas para evitar divergências nos resultados de estudos semelhantes. Esse movimento culminou na criação da International Organization for Standardization (ISO) 14040, em 1997, e posteriormente da ISO 14044, em 2006, que estabelecem princípios, estrutura e requisitos para a execução da ACV (ISO, 2006).

No Brasil a técnica foi incorporada na década de 1990 com a atuação do Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANA), e sua normatização consolidou-se com a publicação da Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). A criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), em 2002, impulsionou a difusão do método no país (Willers, Rofrigues, 2012).

De acordo com a United States Environmental Protection Agency (Passuello *et al.*, 2014), a ACV consiste em um método estruturado que possibilita examinar os possíveis impactos ambientais associados a um produto ou serviço em todas as etapas de sua existência — desde a obtenção dos insumos naturais até seu descarte ou destinação final, ou, como refere a literatura, “do berço” até a disposição final “ao túmulo” (Stamford, 2020). Essa abordagem oferece suporte a empresas e formuladores de políticas públicas na identificação de pontos críticos e na definição de oportunidades de melhoria em toda a cadeia produtiva, contribuindo para decisões estratégicas e ações de responsabilidade socioambiental (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006; Klöpffer; Grahl, 2014; Santos, 2009).

Complementando essa perspectiva, Stamford (2020) destaca que a ACV se constitui como uma ferramenta abrangente para analisar tanto os impactos negativos quanto os positivos relacionados ao ciclo de vida de um produto, considerando desde a extração da matéria-prima, sua incorporação no processo produtivo, até a destinação final adequada. Dessa forma, a metodologia não apenas fornece uma visão integrada dos efeitos ambientais, mas também se mostra essencial para a gestão ambiental e o planejamento de estratégias voltadas ao desenvolvimento sustentável.

Adicionalmente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, de 2 de agosto, de 2010, em seus artigos 3º e 6º, reconhece a ACV como um recurso relevante para o estudo das consequências ambientais decorrentes dos processos produtivos, uma vez que esses impactos podem afetar tanto a qualidade ambiental quanto a saúde humana (Brasil, 2010).

A ACV segue uma estrutura metodológica consolidada, composta por quatro fases principais, conforme definido pela ISO 14040 e ISO 14044, permitindo analisar de forma sistemática os impactos ambientais de produtos e processos:

- Definição de objetivo e escopo: Nesta fase, são estabelecidos os objetivos do estudo, o público-alvo e os limites do sistema a ser avaliado, como a cadeia completa do *denim*, do cultivo do algodão até a lavagem final da peça. Também se define a função do produto, unidade funcional e fronteiras do estudo, garantindo clareza sobre quais etapas e fluxos serão incluídos na análise;

- Inventário de ciclo de vida (ICV): Consiste na coleta e quantificação de entradas (recursos naturais, água, energia, insumos químicos) e saídas (resíduos, emissões e efluentes) em cada etapa da cadeia produtiva. No caso do *denim*, inclui o levantamento detalhado de consumo hídrico na fiação e tingimento, emissões de CO₂ associadas ao uso de energia, e geração de resíduos sólidos e efluentes químicos em lavanderias e acabamentos;

- Avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV): Com base nos dados do inventário, os impactos são avaliados em categorias específicas, como consumo de água, emissões de gases de efeito estufa, eutrofização e toxicidade. Essa fase permite identificar, valendo-se das categorias e indicadores de impacto, utilizando métodos *midpoint* (foco nos processos intermediários) e *endpoint* (foco nos danos finais ao meio ambiente e à saúde humana), quais etapas e processos contribuem mais significativamente para os impactos ambientais, oferecendo subsídios objetivos para priorizar ações de melhoria.

- Interpretação: Na etapa final, os resultados são analisados criticamente, considerando incertezas, suposições e possíveis *trade-offs* entre diferentes categorias de impacto. A interpretação fornece recomendações estratégicas para redução de impactos, como adoção de tecnologias mais limpas, reaproveitamento de água e reciclagem de resíduos têxteis, favorecendo decisões alinhadas à sustentabilidade e à economia circular.

Dessa forma, a ACV não apenas quantifica impactos, mas também fornece uma visão integrada da sustentabilidade ao longo de toda a cadeia do *denim*, permitindo que marcas e indústrias identifiquem pontos críticos e implementem melhorias de forma científicamente

embasada.

Os métodos de ACV podem variar significativamente conforme o enfoque metodológico, o conjunto de categorias de impacto ambiental consideradas e os modelos de caracterização utilizados (ISO 14040, 2006). Essa diversidade permite que pesquisadores e empresas escolham abordagens adequadas aos seus objetivos, seja para avaliação comparativa de produtos, identificação de pontos críticos da cadeia produtiva ou suporte a decisões estratégicas de sustentabilidade.

De modo geral, os métodos de ACV podem ser classificados em quatro grandes grupos:

1. Métodos Baseados em Problemas (*midpoint*): analisam categorias intermediárias de impacto, como aquecimento global, acidificação, eutrofização ou toxicidade. São amplamente utilizados por sua robustez científica e facilidade de comparação entre estudos. Exemplos: *Centrum voor Milieukunde Leiden - Impact Assessment* (CML-IA) desenvolvido pela Universidade de Leiden (Holanda), foca em categorias como mudança climática, depleção de ozônio e ecotoxicidade (Guinée *et al.*, 2002); *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts* (TRACI) criado pela EPA (EUA), adaptado para o contexto norte-americano (Bare, 2012); *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) referência europeia para harmonização de estudos de ACV (European Commission - Joint Research Centre, 2011).

2. Métodos Baseados em Danos (*endpoint*): traduzem as categorias intermediárias em danos finais aos três principais “áreas de proteção”: saúde humana, qualidade dos ecossistemas e recursos naturais. Exemplos: *Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment* ou Eco-indicator 99, desenvolvido pelos pesquisadores holandeses do PRé Sustainability. Um dos pioneiros na abordagem de danos, ou seja, traduz impactos ambientais em três categorias de danos finais: Saúde humana (exemplos: doenças relacionadas à poluição do ar, mudanças climáticas, radiação); Qualidade do ecossistema (exemplos: acidificação, eutrofização, ecotoxicidade); Recursos naturais (exemplos: uso de combustíveis fósseis e minerais). Fornece uma métrica simplificada e robusta para comparar produtos, processos e serviços com base em seu impacto ambiental total, além de permitir agregar diferentes impactos em um único indicador, facilitando tomadas de decisão (Goedkoop Spriensma, 2001). Exemplos: *A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level* ou ReCiPe, desenvolvido em parceria por PRé Sustainability, Radboud University Nijmegen, Instituto Nacional de Saúde Pública e Meio Ambiente da Holanda e Radboud University Medical Center. Lançado em 2008, com atualizações posteriores —

ReCiPe 2016 e 2023. É considerado sucessor do Eco-indicator 99, e integra conceitos *midpoint* e *endpoint*, permitindo flexibilidade analítica e ampla aceitação internacional. Permite diferentes níveis de detalhamento e combina resultados de forma flexível, oferecendo uma estrutura mais moderna, consistente e científica para quantificar e comparar impactos ambientais em estudos de ciclo de vida (Huijbregts *et al.*, 2017).

3. Métodos Híbridos ou Integrados: Esses métodos combinam abordagens *midpoint* e *endpoint*, oferecendo uma visão completa dos impactos e danos. São utilizados quando o estudo requer tanto a precisão dos indicadores intermediários quanto a síntese dos resultados finais. Exemplo: ReCiPe 2016, amplamente reconhecido e recomendado pelo European Commission Joint Research Centre (JRC) como modelo de referência (Hauschild *et al.*, 2018).

4. Métodos de Pegada Ambiental: Mais recentes, esses métodos têm foco em indicadores únicos normalizados, que facilitam a comunicação de resultados para o público e gestores. Avaliam o desempenho ambiental global de produtos ou organizações. Exemplos: *Environmental Footprint* (PEF), desenvolvido pela European Commision (EC) em 2013 (EC, 2025); *Carbon Footprint*, mensura emissões de gases de efeito estufa, expressas em CO₂ equivalente (Wiedmann; Minx, 2008); e *Water Footprint*, mede o consumo e a poluição da água (Hoekstra *et al.*, 2011).

Apesar dos avanços, a ACV, ao longo dos anos, ainda apresenta desafios, especialmente no Brasil, como a elevada complexidade de coleta de dados e a dificuldade de adaptação a contextos regionais de metodologias estrangeiras à realidade produtiva nacional (Monteiro; Gomes, 2011; Rezende, 2024).

4.1.1 Resíduos Têxteis

Considerando a cadeia produtiva têxtil, especialmente no segmento de *denim/jeans*, envolve múltiplas etapas que vão desde a extração da matéria-prima até a produção, uso e disposição final dos produtos. Um planejamento responsável deve considerar não apenas a eficiência produtiva, mas também o desempenho ambiental em todas essas fases, incluindo a coleta, separação, reaproveitamento, reciclagem e destinação adequada dos resíduos gerados (Lima, 2007). Nesse contexto, a análise da ACV se apresenta como uma ferramenta estratégica para apoiar decisões assertivas, como a escolha de fibras ou processos que potencializem a reciclagem e minimizem impactos ambientais (Zonatti, 2013).

A aplicação da ACV na indústria têxtil permite avaliar a viabilidade de caminhos

sustentáveis para a reciclagem e o manejo dos produtos, destacando especialmente a necessidade de tratamento adequado dos efluentes. A indústria têxtil é responsável por uma parcela significativa do uso de corantes, predominando os azoicos devido à demanda por cores intensas. Grande parte desses corantes é aplicada no tingimento de tecidos, mas, muitas vezes, os resíduos resultantes não recebem tratamento final adequado, contaminando corpos d'água (Peralta; Paulo, 2024).

Os corantes reativos, utilizados principalmente em fibras de algodão, ligam-se às fibras por mecanismos de adição ou substituição sob condições alcalinas e temperaturas elevadas. Entretanto, uma fração significativa sofre hidrólise e é liberada nos banhos de tingimento e águas de lavagem. Quando descartados sem tratamento, esses resíduos podem reduzir a penetração de luz nos ecossistemas aquáticos, comprometer a qualidade da água, ser tóxicos para organismos da cadeia alimentar e para a vida aquática em geral. Além disso, alguns corantes comerciais são formulados para resistir à biodegradação, aumentando o risco de contaminação ambiental de longo prazo (Peralta; Paulo, 2024).

Ademais, estudos da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb, 2021); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa, 2020), empresa Ellen Macarthur Foundation (2017); United Nations Environment Programme (UNEP, 2023) e Zonatti (2016) indicam que os maiores impactos ambientais do setor têxtil concentram-se na etapa de processamento, desde a produção de matérias-primas, como o algodão, intensiva em água e insumos químicos, até os processos de tingimento e acabamento, caracterizados pelo alto consumo energético e emissão de poluentes.

Os resíduos têxteis representam um dos maiores desafios ambientais da indústria da moda e do vestuário, devido à elevada geração de sobras durante o processo produtivo e ao descarte inadequado de peças após o consumo. Segundo Wang (2010), esses resíduos são classificados em duas categorias principais: pós-industriais (PI), que incluem tecidos desperdiçados nas etapas de fiação, tecelagem e confecção; e pós-consumo (PC), que englobam artigos têxteis já utilizados e descartados, muitas vezes deteriorados, fora de moda ou de colorações e composições variadas.

No Brasil, o setor têxtil é responsável por uma parcela significativa da geração de resíduos sólidos urbanos. Estima-se que cerca de 8,02 bilhões de peças de vestuário por ano, sejam produzidas ou comercializadas anualmente (ABIT, 2024), resultando em aproximadamente 170 mil toneladas de resíduos têxteis gerados por ano (Estevão, 2024). Desse total, apenas cerca de 20% é reciclado ou reaproveitado, enquanto entre 70% e 80% é descartado inadequadamente, sendo destinado a aterros sanitários, lixões ou incinerado, sem

qualquer aproveitamento (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - ABREMA, 2024b). Segundo a Agência Brasil (2025), somente nos domicílios brasileiros são descartadas mais de 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis por ano, o que representa cerca de 5,6% do total de resíduos sólidos urbanos gerados no país.

O Panorama dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil, divulgado pela ABREMA evidencia que a falta de políticas públicas específicas e de incentivos à economia circular intensifica o problema, resultando em descarte irregular e desperdício de recursos. Segundo o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (ABREMA, 2024a), esses dados reforçam a necessidade de adoção de soluções inovadoras, como tecnologias limpas, logística reversa e maior integração entre cadeias produtivas, visando reduzir os impactos ambientais e consolidar práticas mais sustentáveis no setor têxtil brasileiro.

Anualmente, grandes volumes de resíduos têxteis são gerados tanto na produção industrial quanto pelo consumo final. O grupo de pesquisa Sustexmoda, vinculado à Universidade de São Paulo, monitora os resíduos coletados na cidade de São Paulo pela empresa Logística Ambiental de São Paulo S.A. (LOGA), responsável pelo recolhimento desses materiais (Sustexmoda, 2025).

Paralelamente, observa-se uma mudança crescente no comportamento do consumidor em direção ao consumo consciente. Segundo o relatório Um Ecodespertar (The Economist Intelligence Unit, 2021), a demanda por produtos sustentáveis aumentou globalmente em 71% desde 2016. Esse movimento impulsiona o surgimento de empresas que, além do crescimento econômico, adotam práticas voltadas à sustentabilidade e à promoção de impactos sociais e ambientais positivos.

A gestão de resíduos têxteis no Brasil enfrenta desafios significativos, como a falta de infraestrutura adequada para coleta e reciclagem, baixa conscientização sobre descarte correto e complexidade na triagem de materiais pós-consumo, que muitas vezes contêm misturas de fibras, corantes e acabamentos químicos (ABRELPE, 2024). Entretanto, essas dificuldades representam oportunidades para iniciativas de economia circular, nas quais os resíduos têxteis podem ser reaproveitados como matéria-prima para novos produtos, reduzindo a demanda por recursos naturais e minimizando impactos ambientais.

O ciclo de vida do produto têxtil refere-se às fases desde a produção até o descarte. Segundo Manzini e Vezzoli (2016) e Stamford (2020), o ciclo de vida engloba todos os fluxos de matéria, energia e emissões associados às atividades do produto, desde a extração de recursos (nascimento) até o tratamento final após o uso (morte). A aplicação da metodologia *Life Cycle Design* permite identificar problemas principais de um produto ou serviço e

priorizar ações para o *design* sustentável, estruturando o ciclo de vida em cinco fases: pré-produção, produção, distribuição, uso e descarte.

Empresas que trabalham com *design* a partir de resíduos têxteis inserem-se em diferentes etapas do ciclo de vida: ao aproveitar resíduos de pré-consumo (como retalhos de confecção), participam da etapa de produção de novos produtos; ao aproveitar resíduos pós-consumo, atuam na etapa de descarte de outros produtos, promovendo o reaproveitamento e a economia circular.

Adaptando a metodologia ao contexto da indústria têxtil, é possível estruturar o ciclo de vida em cinco fases principais, pré-produção, produção, distribuição, uso e descarte, cada uma com possibilidades específicas de reaproveitamento e inserção na economia circular. O Quadro 1 apresenta a adaptação do modelo *Life Cycle Design* para produtos têxteis, destacando as etapas e as oportunidades de sustentabilidade associadas a cada fase.

Quadro 1 – Adaptação do *Life Cycle Design* para Produtos Têxteis

Fase do ciclo de vida	Etapas e aplicações no produto têxtil	Possibilidades de reaproveitamento / economia circular
1. Pré-produção	Produção de fibras (naturais ou sintéticas), fiação, tecelagem e tingimento.	Reaproveitamento de retalhos de tecido, sobras de fiação e tingimento para novos produtos.
2. Produção	Design e confecção das peças, corte, costura e acabamento.	Upcycling de resíduos de corte e produção; criação de acessórios ou novos produtos a partir de retalhos.
3. Distribuição	Embalagem, transporte, armazenamento e comercialização das peças.	Uso de embalagens recicláveis ou reutilizáveis; logística reversa para produtos devolvidos.
4. Uso	Consumo e manutenção pelos usuários (lavagem, conservação, reparos).	Programas de prolongamento da vida útil, reparos, doação ou revenda de produtos usados.
5. Descarte	Destinação final das peças: aterros sanitários, incineração ou reciclagem.	Reciclagem de fibras, compostagem de fibras naturais, transformação em novos tecidos ou produtos industriais (isolantes, enchimentos).

Fonte: Adaptado de Ziegler, Freitas e Monteiro (2025, p. 4).

A adoção de estratégias de reaproveitamento de resíduos têxteis não apenas reduz impactos ambientais, mas também agrega valor econômico e social, promovendo criatividade, inovação e responsabilidade ambiental. Projetos de *upcycling*, utilização de fibras recicladas e integração da indústria com políticas públicas e educação ambiental fortalecem a economia circular no setor têxtil, alinhando-se aos princípios da Agenda 2030 da United Nations,

(ONU, 2015) e às práticas de responsabilidade social corporativa (WWF, 2023; Textile Exchange, 2021).

4.1.2 Processo de Reciclagem Têxtil

O Brasil figura entre os dez maiores produtores mundiais de fibras, fios e tecidos, representando um setor estratégico para a economia nacional. O país produziu aproximadamente 2 milhões de toneladas de têxteis em 2023, consolidando-se como o quinto maior produtor mundial de têxteis básicos, como fios, tecidos e malhas, além de ser o quarto maior produtor e consumidor de *denim*, evidenciando sua relevância no segmento de vestuário (ABIT, 2024). Esse posicionamento estratégico se apoia em uma cadeia produtiva robusta, que abrange desde a produção de fibras, como o algodão, do qual o Brasil é o quarto maior produtor mundial, até a confecção final de produtos têxteis, movimentando cerca de 1,3 milhão de trabalhadores formais (ABIT, 2023). Entretanto, esse crescimento produtivo é acompanhado de graves impactos ambientais, especialmente decorrentes do descarte inadequado de resíduos têxteis e da baixa taxa de reciclagem e reaproveitamento de materiais (ABIT, 2023; Elia, 2025).

Grande parte dos resíduos têxteis no país é destinada a aterros sanitários sem qualquer tratamento prévio, contribuindo para o esgotamento de áreas de disposição e para a emissão de gases de efeito estufa durante a decomposição dos materiais (Residômetro Têxtil, 2025). Esse cenário é agravado pela dinâmica do *fast fashion*, modelo de consumo que intensifica a produção de peças de curta durabilidade e estimula o descarte acelerado (Niinimäki *et al.*, 2020).

De acordo com dados do grupo de pesquisa Sustexmoda (2025), entre 2017 e 2025 foram coletadas 90.785 toneladas de resíduos têxteis apenas na cidade de São Paulo, sendo 63.255 toneladas de origem industrial e 27.530 toneladas de pós-consumo. Esses números evidenciam a urgência de medidas que promovam a circularidade e a revalorização de materiais na cadeia têxtil.

A reciclagem têxtil consiste na reintegração de resíduos e sobras provenientes de processos de confecção ou de peças descartadas ao ciclo produtivo, podendo envolver ou não alterações físico-químicas no material original (Elia, 2025; Lopes; Barros; Rodrigues, 2025). Essa prática se divide em dois tipos principais: Reciclagem interna (dentro do processo), quando o resíduo é reaproveitado como insumo no mesmo processo produtivo que o gerou; e Reciclagem externa (fora do processo), quando o resíduo é reaproveitado em outro processo,

diferente daquele de origem (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI, 2021). A NBR 10004, também reforça essa distinção ao tratar da destinação e reaproveitamento de resíduos industriais no contexto da gestão ambiental (ABNT, 2004).

No setor têxtil brasileiro, diversas empresas vêm adotando práticas de reciclagem interna para reduzir resíduos gerados durante a produção e reaproveitar aparas e sobras de tecidos. A Malwee implementou um programa de reciclagem de aparas de malhas, reincorporando essas sobras na fabricação de novos fios e malhas, o que permite reduzir a necessidade de matéria-prima virgem e diminuir o impacto ambiental de suas operações (Malwee, 2024). De forma similar, a Pettenati, localizada no Rio Grande do Sul, realiza a reciclagem de retalhos e fios gerados internamente, triturando e reprocessando-os em fibras que retornam ao ciclo de fiação, chegando a utilizar cerca de 30% de fibras reaproveitadas na produção (Pettenati, 2023; 2025). A empresa Dudalina, também em Santa Catarina, reaproveita aparas de camisas para confeccionar novos produtos, como bolsas e brindes corporativos, além de reinserir parte desses resíduos no processo produtivo, evitando a geração de cerca de 40 toneladas de resíduos por ano (Bennemann; Alperstedt, 2022). A Dalila Têxtil, também em Santa Catarina, utiliza um sistema fechado em que resíduos de malhas e fibras gerados no corte e fiação são totalmente reprocessados internamente, aproximando-se do conceito de resíduos industriais zero e reduzindo custos de produção (Dalila Têxtil, 2023). No setor de *denim*, a Santista Têxtil desenvolveu uma linha de tecidos a partir de fibras recicladas internamente, obtidas de resíduos da produção de *jeans*, promovendo economia de água e redução significativa de resíduos industriais (Santista Têxtil, 2023). Esses exemplos demonstram que a reciclagem interna é uma estratégia eficiente para aumentar a sustentabilidade do setor têxtil, permitindo a redução do desperdício, a economia de recursos naturais e a diminuição dos impactos ambientais associados à produção de roupas e tecidos no Brasil. Além disso, essas práticas contribuem para o cumprimento de normas ambientais e para o fortalecimento das políticas de responsabilidade socioambiental das empresas.

No Brasil, a reciclagem externa no setor têxtil tem se consolidado como uma estratégia relevante para ampliar a circularidade dos materiais e reduzir a destinação de resíduos a aterros sanitários. Um dos exemplos mais expressivos é o da empresa Retalhar, que atua em parceria com grandes marcas, como Natura, Ambev e Bradesco, realizando a coleta de resíduos têxteis, especialmente uniformes e aparas, para reaproveitamento e coprocessamento em cimenteiras. Desde a sua fundação, a iniciativa já desviou mais de 1.200 toneladas de resíduos dos aterros, contribuindo diretamente para práticas de economia circular (Retalhar,

2024).

Outro exemplo é a *startup* Recycle Cotton, localizada em Santa Catarina, que recebe aparas e retalhos de fábricas têxteis para transformá-los em fibras recicladas, posteriormente revendidas a fiações e malharias, criando um ciclo produtivo fechado entre diferentes agentes da cadeia (Recycle Cotton, 2024). Já em Minas Gerais, a cooperativa Eu Reciclo Tecidos realiza a triagem de sobras de confecções e direciona os resíduos para usos alternativos, como enchimentos, isolamento acústico e produção de novos fios, processando aproximadamente 600 toneladas de resíduos por ano (Eu Reciclo Tecidos, 2024).

A empresa Insecta Shoes, no Rio Grande do Sul, utiliza tecidos reaproveitados, provenientes de roupas descartadas e doações de resíduos industriais, para fabricar calçados e acessórios veganos. Desde 2014, mais de 20 toneladas de resíduos foram reaproveitadas, fortalecendo um modelo de produção limpo e inovador (Insecta Shoes, 2024). Além disso, o Instituto Lixo Zero Brasil tem atuado como articulador entre confecções e cooperativas, estimulando programas de logística reversa que conectam pontos de geração e reaproveitamento de resíduos têxteis, ampliando a reciclagem em diversas capitais brasileiras (Instituto Lixo Zero Brasil, 2024).

O Puket criou, em 2013, o Projeto Meias do Bem, uma iniciativa de economia circular e responsabilidade socioambiental voltada para a reciclagem externa de resíduos têxteis. O projeto coleta meias usadas, furadas ou sem par em pontos de arrecadação espalhados pelo Brasil, como lojas da marca e parceiros comerciais, e as encaminha para um processo de reciclagem industrial. Nessa etapa, as meias são trituradas, transformadas em fibra têxtil e reutilizadas na fabricação de cobertores. Esses cobertores, por sua vez, são doados a instituições sociais que atendem pessoas em situação de vulnerabilidade. Segundo dados divulgados pela própria empresa, desde a sua criação até 2021, a iniciativa arrecadou mais de 1 milhão de pares de meias, o que representa cerca de 30 toneladas de resíduos têxteis que deixaram de ir para aterros sanitários. Além de reduzir significativamente o volume de resíduos e estimular a conscientização sobre descarte responsável, o projeto fortalece ações de impacto social positivo ao fornecer itens essenciais para comunidades em necessidade (Puket, 2021).

Essas iniciativas evidenciam o potencial da reciclagem externa como instrumento de gestão sustentável de resíduos no setor têxtil, favorecendo a criação de novos produtos, a redução de impactos ambientais e a promoção da economia circular. A integração entre empresas, *startups* e cooperativas tem contribuído para transformar resíduos em recursos, impulsionando um modelo de produção mais responsável.

A reciclagem de produtos pós-consumo apresenta desafios adicionais, pois leva em conta desgastes físicos e contaminações que podem comprometer a integridade das fibras (Wang, 2010; Amaral, 2016). De forma geral, o processo pode ser dividido em dois grandes métodos: reciclagem mecânica e reciclagem química.

O processo mecânico, também chamado de desfibragem, é amplamente aplicado a resíduos de algodão e *denim*. O material é inicialmente separado por tipo e cor, passa por máquinas cortadoras rotativas ou guilhotinas automáticas, que removem aviamentos e picotam os tecidos (Laroche, 2021). Em seguida, o material é processado em desfibradeiras compostas por estágios múltiplos (2 a 8), nos quais cilindros com agulhas metálicas desfazem a trama e transformam o tecido em fibras curtas (Amaral, 2016). O produto final é uma massa desfibrada que pode ser utilizada na fabricação de mantas, enchimentos, geotêxteis e até como matéria-prima para nova fiação.

A capacidade produtiva de sistemas de fiação e reciclagem de resíduos de algodão varia significativamente conforme o nível de automação e a tecnologia empregada. Em plantas industriais e linhas semi-industriais, esses sistemas podem atingir faixas de produção que vão de 40 kg/h até 1.000 kg/h, dependendo da complexidade do maquinário e da finalidade da produção (Zonatti, 2013). Equipamentos comerciais utilizados no setor têxtil apresentam, por exemplo, capacidades médias entre 120 e 350 kg/h, como demonstrado por fabricantes especializados em máquinas de reciclagem e abertura de fibras (JINAN MORINTE, 2023; QINGDAO JINYING, 2023). Além disso, projetos de pesquisa e plantas-piloto, como o desenvolvido pelo Hong Kong Research Institute of Textiles and Apparel (HKRITA), demonstram que, mesmo em escalas menores, é possível atingir níveis progressivos de produtividade, variando de dezenas de kg/dia a centenas de kg/h, a depender da configuração técnica adotada (HKRITA, 2023). Essa variação evidencia o potencial de ampliação da reciclagem de resíduos de algodão como estratégia alinhada à economia circular e à bioeconomia, reduzindo impactos ambientais e promovendo maior eficiência no uso de recursos naturais.

Quanto a reciclagem química, essa surgiu como alternativa para reprocessar fibras sintéticas derivadas do petróleo, como poliéster, poliamida e elastano, que não são biodegradáveis (Wang, 2010). Nesse processo, os materiais passam por reações químicas controladas que permitem a recuperação de polímeros puros, reutilizáveis na produção de novos fios ou produtos plásticos.

De acordo com o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), apenas dois processos de reciclagem química de fibras são atualmente registrados e aplicados no Brasil:

Separação de poliamida e elastano, realizada com o uso de ácido fórmico, que dissolve seletivamente a poliamida e permite a recuperação de ambas as fibras; e Reciclagem da poliamida, que envolve a dissolução controlada do tecido sem alteração da estrutura molecular, resultando em *chips* de poliamida que podem ser reprocessados como fibras sintéticas (Amaral, 2016). A Figura 2 apresenta os cinco estágios da transformação de retalhos de poliamida em *chips* de poliamida: (a) retalho de tecido 98% poliamida e 2% elastano; (b) retalho de poliamida alvejado; (c) retalho de poliamida livre de elastano; (d) poliamida ao atingir seu ponto de fusão e (e) *chips* de poliamida.

Figura 2 – Estágios da formação de retalhos de poliamida em *chips* de poliamida



Fonte: Amaral (2016, p. 44).

Esses métodos possibilitam reduzir a dependência de matérias-primas virgens, contribuir para a diminuição do consumo energético e estender o ciclo de vida útil dos produtos têxteis. Contudo, desafios técnicos e logísticos ainda limitam a ampliação dessas práticas no Brasil, especialmente no que se refere à infraestrutura de coleta seletiva, custos de tecnologia e regulamentação ambiental (Amaral, 2016).

A transição para um modelo circular na indústria têxtil requer integração entre produtores, consumidores e políticas públicas, de forma a incentivar a logística reversa, o *design* sustentável e o consumo consciente, pilares fundamentais para reduzir a sobrecarga ambiental e promover um setor mais sustentável e competitivo.

4.1.3 Reciclagem Têxtil em outros Países

A produção global de fibras têxteis tem apresentado crescimento contínuo nas últimas décadas, evidenciando a magnitude do setor e a urgência de práticas mais sustentáveis. De acordo com o Materials Market Report da Textile Exchange, a produção mundial atingiu aproximadamente 124 milhões de toneladas em 2023 e 132 milhões de toneladas em 2024, com projeções de chegar a 160 milhões de toneladas até 2030 caso não haja mudanças significativas no modelo de produção e consumo. Esse aumento expressivo reflete, sobretudo, a expansão da produção de fibras sintéticas e o crescimento do consumo global de vestuário, intensificando os impactos ambientais relacionados à extração de recursos, emissões de gases de efeito estufa e geração de resíduos (Textile Exchange, 2024). Nesse contexto, diversos países vêm implementando políticas de gestão de resíduos têxteis e estratégias de economia circular com o objetivo de reduzir o impacto ambiental da indústria.

Entre os países que mais se destacam, a Alemanha apresenta um dos sistemas mais avançados de reuso e reciclagem têxtil do mundo, fundamentado nos princípios dos “3 Rs” — reduzir, reutilizar e reciclar. O país conta com uma estrutura consolidada de coleta seletiva e triagem, além de incentivos governamentais e fiscais voltados à economia circular (European Environment Agency, 2025).

Na Suécia, políticas públicas voltadas à sustentabilidade também têm ganhado destaque. Na região nórdica, foi desenvolvido em 2015 o Compromisso Têxtil Nórdico, uma iniciativa voluntária voltada a orientar organizações públicas e privadas sobre boas práticas de coleta, triagem e reaproveitamento de têxteis pós-consumo, com o objetivo de promover a circularidade e reduzir impactos ambientais (Nordic Council of Ministers, 2015).

administrações municipais, em conjunto com empresas de gestão de resíduos, atuam como facilitadoras das ações de minimização e reutilização de resíduos domésticos, incluindo os têxteis. De acordo com dados do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), aproximadamente 9 mil toneladas de resíduos têxteis foram encaminhadas para processos de reciclagem em 2017, representando um avanço significativo em comparação aos anos anteriores. Esse aumento reflete uma maior conscientização sobre a importância da economia circular e a adoção de práticas mais sustentáveis no setor têxtil, contribuindo para a redução do descarte em aterros e para o reaproveitamento de materiais na cadeia produtiva (LNEG, 2022).

Outro exemplo relevante é o da Turquia, que em julho de 2021 lançou um plano nacional de Economia Circular abrangendo toda a cadeia têxtil, do berço ao túmulo. O projeto incorpora os pilares do desenvolvimento sustentável e está baseado em diretrizes como: Uso de materiais seguros e limpos; Modelos de negócios circulares; *Design ecológico (green design)*; Produção sustentável de fibras e tecidos; e Criação de redes colaborativas para inovação e reaproveitamento de recursos.

Nos Estados Unidos, apesar da preocupação com a gestão e destinação adequada de resíduos têxteis desde a década de 1960, com avanços em programas de reciclagem pós-consumo e recuperação de materiais (EPA, 2025), a Agência estimou que a geração de resíduos têxteis alcançou aproximadamente 17 milhões de toneladas, correspondendo a cerca de 5,8% de todo o volume de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados naquele ano. A projeção referente a roupas e calçados foi elaborada, em parte, a partir de dados de vendas fornecidos pela American Apparel and Footwear Association. A agência também identificou que uma parcela expressiva dos têxteis é direcionada ao mercado de reutilização; no entanto, esses volumes não são contabilizados na estimativa oficial de geração. É importante destacar que peças de vestuário e tecidos reutilizados acabam, em algum momento, retornando ao fluxo de resíduos, sendo incorporados aos RSU (EPA, 2024).

A taxa de reciclagem total de materiais têxteis em 2018 foi de 14,7%, o que correspondeu a 2,5 milhões de toneladas reaproveitadas. Especificamente para roupas e calçados, a taxa estimada de reciclagem foi de 13%, com base em dados do Secondary Materials and Recycled Textiles Association. Já para artigos como lençóis e fronhas, esse índice atingiu 15,8%. Ainda naquele ano, aproximadamente 3,2 milhões de toneladas de têxteis foram incineradas com recuperação de energia, o que representou 9,3% do total de RSU queimado. Por fim, os aterros sanitários receberam cerca de 11,3 milhões de toneladas de resíduos têxteis, equivalentes a 7,7% de todo o material destinado a esses locais (EPA,

2024).

Em termos mais amplos, a União Europeia aprovou uma diretriz que determina que todos os Estados-Membros implementem sistemas de coleta obrigatória de resíduos têxteis pós-consumo até 2025, reforçando a transição para um modelo de bioeconomia circular, baseado na redução do desperdício e na valorização de materiais ao longo do ciclo de vida do produto (Moralles, 2025).

4.1.4 Impactos dos Processos

A análise comparativa entre as experiências internacionais evidencia que a sustentabilidade na indústria têxtil depende não apenas da adoção de tecnologias limpas, mas também da implementação de modelos de gestão integrados e de políticas públicas eficazes. O avanço de países como Alemanha, Suécia e Turquia demonstra que a economia circular e a bioeconomia podem reduzir substancialmente os impactos ambientais da cadeia têxtil, além de promover benefícios sociais e econômicos em escala global.

No entanto, observa-se que o grau de maturidade e a eficiência dos sistemas de reciclagem variam significativamente conforme o contexto político, econômico e cultural de cada país. Essa constatação reforça a importância da ACV como ferramenta essencial para mensurar, comparar e otimizar os processos produtivos de modo sustentável.

A compreensão dos impactos ambientais e sociais gerados ao longo do ciclo de vida dos produtos têxteis é fundamental para identificar os principais pontos críticos e direcionar estratégias de mitigação. Conforme evidenciam Morita (2013) e Periyasamy e Periyasami (2023), a confecção de uma simples calça *jeans* envolve uma série de etapas que consomem grandes volumes de energia, água e insumos químicos, resultando em significativa geração de resíduos e emissões atmosféricas.

A fase de cultivo do algodão é a mais impactante de todo o processo têxtil, sendo responsável por 61,5% das emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa (Morita, 2013). Isso se deve à volatilização de produtos químicos, ao uso intensivo de fertilizantes nitrogenados e à queima de combustíveis fósseis na operação de maquinários agrícolas (Yu; Yang, 2025).

De forma comparativa, Van der Werf (2004) verificou que o cultivo de cânhamo industrial gera impactos significativamente menores, com 41,1% das emissões ocorrendo na fase de cultivo e 24,6% na produção de fertilizantes, reforçando que alternativas naturais ao

algodão convencional podem reduzir substancialmente a pegada ecológica da indústria.

Além disso, os setores de beneficiamento e tecelagem concentram altos níveis de impacto devido ao consumo energético e à utilização de produtos químicos. A combustão de diesel no transporte rodoviário e a queima de lenha em caldeiras para geração de energia térmica são fatores que contribuem para o aumento da toxicidade humana e da ecotoxicidade aquática. A exposição a compostos como mercaptobenzotiazol, frequentemente encontrados em águas residuais têxteis, tem potencial mutagênico e pode representar riscos para organismos aquáticos e seres humanos (San-Martin *et al.*, 2020).

No setor de beneficiamento e tecelagem, três fatores principais são responsáveis pela maior parte dos impactos ambientais potenciais: (i) o transporte rodoviário, em função da combustão de combustíveis fósseis, como o diesel; (ii) a utilização de produtos químicos, cuja fabricação e queima envolvem também combustíveis fósseis nas caldeiras; e (iii) a queima de lenha para geração de energia térmica necessária ao processo de tecelagem. Esses dois setores concentram os maiores impactos relacionados à toxicidade humana ao longo de todo o ciclo produtivo têxtil, devido ao consumo elevado de energia térmica, sobretudo nas etapas de secagem de fios e tecidos, e ao uso intensivo de substâncias químicas.

Além disso, a etapa de acabamento (lavanderia) também contribui significativamente para a formação de material particulado, ampliando os impactos ambientais. Para a avaliação dos efeitos, Morita (2013) utilizou parâmetros *midpoints* e *endpoints* para comparação entre os impactos gerados em cada fase do ciclo de vida da produção de *jeans*. A análise demonstrou que o setor de tecelagem apresenta os maiores índices de impacto em ecotoxicidade marinha, eutrofização de água doce e toxicidade humana. Já a produção de algodão se destaca por contribuir significativamente para quase todas as categorias de impacto, revelando-se uma das etapas mais críticas para a sustentabilidade do processo produtivo do *denim*. Essa constatação reforça a necessidade de investimentos em inovação e pesquisa para mitigar impactos ambientais, aumentar a eficiência energética e reduzir o consumo de recursos naturais, contribuindo assim para práticas mais limpas e sustentáveis (Morita, 2013).

De forma associada aos impactos ambientais, é possível observar também efeitos sociais relevantes em cada etapa da cadeia produtiva têxtil. Um dos pontos críticos é a predominância de mulheres, cerca de 75% da força de trabalho do setor, que são particularmente afetadas pelas condições precárias de trabalho e pela baixa sustentabilidade dos processos produtivos. Isso evidencia que a busca por soluções sustentáveis deve envolver não apenas aspectos ambientais e tecnológicos, mas também dimensões sociais e laborais,

visando garantir condições mais justas e dignas para os trabalhadores e trabalhadoras da indústria têxtil.

4.2 ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS: ECONOMIA CIRCULAR E BIOECONOMIA

4.2.1 Economia Circular

Segundo a Ellen MacArthur Foundation (2017), a economia global foi historicamente moldada por um modelo linear de produção e consumo, caracterizado pelo ciclo “extrair – produzir – descartar”. Esse modelo, embora eficiente para impulsionar o crescimento industrial durante o século XX, tornou-se ambientalmente insustentável. Ele depende da extração contínua de recursos naturais finitos e resulta em altos níveis de resíduos e emissões, especialmente na indústria têxtil, uma das mais intensivas em recursos e poluentes do planeta (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

Essa lógica linear causa perdas econômicas significativas e degradação ambiental, além de desperdiçar oportunidades de inovação e regeneração dos ecossistemas. De acordo com um relatório da Boston Consulting Group (BBG), estima-se que o valor bruto perdido anualmente com resíduos têxteis não reaproveitados possa chegar a aproximadamente US\$ 150 bilhões por ano em escala global (BCG, 2024). Na Europa, a European Apparel and Textile Confederation (EURATEX) projeta que a reciclagem e reinserção de têxteis no ciclo produtivo poderiam gerar entre € 3,5 e 4,5 bilhões por ano até 2030, fortalecendo cadeias de valor mais sustentáveis e circulares. No entanto, a transição para esse modelo ainda enfrenta desafios estruturais, como a ausência de incentivos fiscais adequados, barreiras tecnológicas no processo de reciclagem e a falta de políticas públicas integradas, fatores que dificultam a adoção em larga escala (EURATEX, 2023; BCG, 2024). No entanto, a transição para um modelo circular enfrenta desafios estruturais, como a falta de incentivos fiscais, as dificuldades tecnológicas de reciclagem e a ausência de políticas públicas integradas, que retardam sua adoção em larga escala (UNEP, 2023).

Conforme Thiago Oliveira Rodrigues (2025), pesquisador do IBICT/MCTI, em palestra apresentada no “Global Meeting – Circuito COP30: Simpósio de Economia Circular e Cadeias Produtivas Sustentáveis”, apenas 9% da economia global opera de forma verdadeiramente circular. A circularidade implica em um sistema regenerativo e restaurativo, em que o fluxo de materiais é mantido em ciclos fechados, minimizando resíduos, emissões e consumo energético. Para que isso seja alcançado, é necessário adotar *designs* de longa

duração, promover o reparo, o reuso e a remanufatura, e estabelecer infraestruturas de reciclagem e logística reversa.

Nesse contexto, limitar o aumento da temperatura global a menos de 1,5°C, conforme o Acordo de Paris, exige a incorporação dos princípios da economia circular em todos os setores produtivos (Fransen, 2025). Isso significa usar menos recursos, substituir matérias-primas por alternativas sustentáveis e prolongar a vida útil dos produtos por meio da reutilização e da reciclagem.

Na perspectiva têxtil, o desafio central está em redefinir o valor dos materiais não biodegradáveis e integrá-los a sistemas produtivos que respeitem os ciclos biológicos e tecnológicos propostos por Braungart e McDonough (2009) na filosofia *Cradle to Cradle*. Nessa abordagem, os produtos são projetados desde o início para retornar de forma segura à natureza ou ao ciclo industrial, sem perda de valor nem geração de resíduos perigosos.

Além de uma prática de produção, a economia circular constitui uma ideologia transformadora que propõe a remodelação completa dos sistemas econômicos, industriais e sociais. Como destacam Stahel (2016) e Kirchherr *et al.* (2023), ela busca substituir a noção de fim de vida pelo conceito de restauração, gerando crescimento econômico dissociado da extração de recursos naturais. O modelo baseia-se na otimização dos estoques de materiais renováveis, na redução de riscos ecológicos e na preservação do capital natural, elementos fundamentais para a bioeconomia moderna.

Para sintetizar as estratégias que viabilizam a transformação da indústria têxtil de um modelo linear para um modelo circular, Koszewska (2018) relaciona um conjunto de ações estratégicas que devem ser adotadas pelos diferentes agentes do setor. Entre elas, destacam-se:

- *Design* para circularidade, com foco na criação de produtos duráveis, modulares e mais fáceis de reciclar;
- Uso de matérias-primas sustentáveis, priorizando fibras naturais de origem renovável e fibras recicladas, reduzindo a dependência de recursos não renováveis;
- Desenvolvimento de tecnologias limpas, que minimizem o uso de água, energia e produtos químicos ao longo da cadeia produtiva;
- Implementação de modelos de negócio circulares, como aluguel, revenda, compartilhamento e remanufatura de roupas;
- Adoção de cadeias de suprimento fechadas, com ênfase na recuperação e reintegração de materiais pós-consumo no ciclo produtivo;
- Educação e engajamento do consumidor, incentivando hábitos de consumo mais conscientes e a devolução de produtos ao final de sua vida útil; e

- Parcerias entre empresas e políticas públicas eficazes, que favoreçam a infraestrutura para coleta, triagem e reciclagem de têxteis.

Essas estratégias, articuladas de forma integrada, contribuem para reduzir desperdícios, aumentar a eficiência no uso de recursos e fomentar uma economia circular têxtil, alinhada a objetivos ambientais e sociais de longo prazo (Koszewska, 2018).

Algumas etapas ainda precisam ser redesenhas para que o ciclo da indústria têxtil e de vestuário se torne verdadeiramente sustentável. Entre essas etapas que demandam transformação Koszewska (2018). destaca:

- *Design* e desenvolvimento do produto — deve incorporar princípios de *ecodesign*, priorizando durabilidade, multifuncionalidade, facilidade de desmontagem e uso de materiais recicláveis ou biodegradáveis;

- Seleção e produção de matérias-primas — necessita de transição para fibras sustentáveis (naturais renováveis, recicladas ou regeneradas), com rastreabilidade e menor impacto ambiental;

- Processos de fabricação — requerem tecnologias mais limpas, uso eficiente de recursos hídricos e energéticos, redução de produtos químicos tóxicos e aproveitamento máximo dos resíduos gerados na produção;

- Distribuição e logística — devem ser reorganizadas para minimizar emissões de transporte e facilitar o retorno de produtos pós-consumo, integrando cadeias reversas;

- Uso e consumo — envolve incentivar práticas como aluguel, compartilhamento, revenda, extensão da vida útil das roupas e conscientização do consumidor sobre descarte responsável;

- Coleta e triagem pós-consumo — precisam ser fortalecidas para garantir a separação adequada dos materiais, facilitando a reciclagem e a reinserção dos têxteis no ciclo produtivo;

- Reciclagem e reaproveitamento — devem priorizar processos de desfibragem, regeneração de fibras e *upcycling*, evitando a destinação a aterros ou incineração; e

- Fechamento do ciclo — integração efetiva entre *design*, produção e reaproveitamento, garantindo um *loop* fechado em que nenhum material seja desperdiçado.

Essas etapas, quando redesenhas e integradas, representam um modelo circular completo, no qual os resíduos são eliminados e os recursos permanecem em circulação pelo maior tempo possível, conforme proposto por Koszewska (2018).

O modelo de economia circular, propõe, como exposto, um sistema produtivo autossuficiente, no qual todos os recursos são reaproveitados e nenhum resíduo é gerado. No entanto, sua aplicação prática enfrenta limitações significativas, dado que depende de

múltiplas variáveis, incluindo tecnologia, logística, comportamento do consumidor e políticas públicas, tornando o ciclo totalmente fechado um ideal difícil de ser alcançado (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Para complementar essa abordagem, Georgescu-Roegen em seu livro *The Entropy Law and the Economic Process*, introduziu a perspectiva das ciências naturais na análise econômica. Ao aplicar o conceito de entropia, o autor demonstrou que a economia é limitada pela disponibilidade de recursos naturais, reforçando que não é possível atingir uma solução econômica definitiva sem considerar os limites impostos pela natureza (Cechin; Veiga, 2010), e nesse contexto, surge a bioeconomia.

4.2.2 Bioeconomia

A Bioeconomia fundamenta-se no estudo de sistemas biológicos para desenvolver tecnologias e processos produtivos alinhados aos limites naturais do planeta. Seu objetivo é gerar produtos e serviços mais sustentáveis, promovendo o uso eficiente de recursos renováveis, valorizando a biodiversidade e estimulando políticas públicas que priorizem a gestão responsável dos recursos naturais (Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD, 2009). No Brasil, a bioeconomia tem se mostrado um instrumento estratégico para impulsionar o avanço tecnológico, consolidar uma economia de baixo carbono e fortalecer a imagem do país no cenário internacional. Segundo o Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2024), a adoção de práticas bioeconômicas contribui para o aumento de investimentos, geração de empregos e desenvolvimento de soluções industriais ambientalmente responsáveis.

A Agenda CNI reforça que o uso sustentável da biodiversidade não apenas mitiga os impactos ambientais, mas também cria oportunidades econômicas e sociais. Empresas que incorporam princípios bioeconômicos em seus processos conseguem reduzir desperdícios, otimizar insumos e desenvolver produtos inovadores que respeitam os ciclos naturais (CNI, 2024). Essa abordagem está alinhada com os objetivos globais de descarbonização e de uma transição justa para modelos produtivos sustentáveis.

Quando aplicada à cadeia têxtil, a bioeconomia se manifesta de diversas formas: desde o uso de matérias-primas renováveis, como algodão orgânico, fibras vegetais alternativas (cânhamo, linho e bambu), biopolímeros e corantes naturais, até a implementação de processos de *upcycling* e integração com a Economia circular, permitindo fechar ciclos de

materiais de forma eficiente e consciente. Essa integração é especialmente relevante no segmento *denim*, um dos mais intensivos em recursos hídricos e químicos, onde inovações bioeconômicas têm contribuído para reduzir impactos ambientais significativos.

Pesquisas recentes apontam que a substituição de insumos sintéticos por biotecnológicos e a utilização de bioprocessos na produção de *denim* podem reduzir drasticamente o consumo de água e energia, além de diminuir a geração de efluentes contaminantes (Periyasamy; Periyasami, 2023). Além disso, iniciativas de empresas globais do setor vêm incorporando enzimas e microrganismos no processo de acabamento do *denim*, substituindo tratamentos químicos tradicionais por soluções de base biológica, contribuindo para um ciclo produtivo mais limpo (Elahi *et al.*, 2019; Harlapur; Sreenivasaiah, 2017; Khan Mondal, Uddin, 2012; Patra; Madhu, Bala, 2018;

A Agenda CNI reforça que o uso sustentável da biodiversidade não apenas mitiga os impactos ambientais, mas também cria oportunidades econômicas e sociais. Empresas que incorporam princípios bioeconômicos em seus processos conseguem reduzir desperdícios, otimizar insumos e desenvolver produtos inovadores que respeitam os ciclos naturais (CNI, 2024).

Quando aplicada à cadeia têxtil, a bioeconomia se manifesta na criação de produtos com matérias-primas renováveis, na implementação de processos de *upcycling* e na integração com o modelo circular, fechando o ciclo de materiais de forma consciente e eficiente, podendo reduzir as emissões associadas ao ciclo de vida de produtos, além de gerar novas oportunidades de mercado com maior valor agregado. Dessa forma, a bioeconomia e a economia circular se complementam, oferecendo uma abordagem sistêmica que equilibra viabilidade econômica, responsabilidade social e sustentabilidade ambiental, essencial para a transição para um setor têxtil mais sustentável e resiliente (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

4.2.3 Integração com ACV para Decisões Sustentáveis

Diante da ACV constituir-se de uma ferramenta estratégica para a tomada de decisões sustentáveis, ao permitir analisar de maneira abrangente os impactos ambientais associados a produtos, processos e serviços ao longo de todas as etapas de sua existência, do berço ao túmulo (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006, Stamford, 2020), tem-se nela, uma abordagem sistêmica que fornece informações objetivas que orientam empresas e formuladores de políticas públicas a identificar pontos críticos de consumo de recursos naturais, emissões de

poluentes e geração de resíduos, possibilitando a implementação de soluções que promovam a sustentabilidade ambiental, econômica e social.

No contexto do setor têxtil, a integração da ACV com estratégias de economia circular e bioeconomia se torna fundamental. Por meio da ACV, é possível quantificar os impactos de diferentes matérias-primas e comparar alternativas de produção e reciclagem, permitindo escolhas que reduzam o consumo de água, energia e produtos químicos (BOSTON CONSULTING GROUP, 2025). Além disso, a ACV auxilia na identificação de etapas do ciclo produtivo em que os resíduos podem ser reaproveitados, seja por meio de *upcycling*, reciclagem mecânica ou transformação em novos insumos biológicos, integrando princípios da economia circular e da bioeconomia (Ellen MacArthur Foundation, 2021).

Outro benefício da integração da ACV com estratégias sustentáveis é a possibilidade de mensurar impactos indiretos, como a redução da emissão de gases de efeito estufa e a preservação da biodiversidade, quando se opta por matérias-primas renováveis ou processos mais eficientes. Dessa forma, a ACV não se limita a fornecer diagnósticos ambientais, mas se torna um instrumento de planejamento e inovação, orientando decisões corporativas que equilibram viabilidade econômica e responsabilidade socioambiental.

Portanto, a integração da ACV com a economia circular e a bioeconomia representa um caminho essencial para a transição para um modelo produtivo mais sustentável, resiliente e competitivo, especialmente em setores de alta intensidade de recursos, como a indústria têxtil.

Nesse sentido, a aplicação de estratégias de economia circular e bioeconomia surge como alternativa para mitigar esses impactos. A implementação de práticas como a reutilização de fibras, reciclagem mecânica e química, e o *design* para desmontagem contribui para prolongar o ciclo de vida útil das peças e reduzir a demanda por matérias-primas virgens. Iniciativas de marcas internacionais, como a Levi's e a H&M, já demonstraram que programas de recolhimento e reaproveitamento de *jeans* usados podem reduzir emissões e consumo hídrico de forma significativa.

A bioeconomia, por sua vez, propõe soluções baseadas em recursos renováveis e processos biotecnológicos. Exemplos incluem o uso de corantes naturais e biodegradáveis em substituição aos corantes sintéticos e a adoção de fibras alternativas cultivadas de forma regenerativa. Tais estratégias não apenas reduzem o impacto ambiental, como também agregam valor à cadeia produtiva, alinhando-se a princípios de sustentabilidade e inovação.

Os resultados, portanto, indicam que a produção convencional de *denim* possui elevado custo ambiental, mas também revelam que há um potencial expressivo de mitigação

por meio da reestruturação do ciclo produtivo em direção a um modelo mais circular e bioeconômico. A integração entre inovação tecnológica, reaproveitamento de materiais e práticas regenerativas configura-se como um caminho viável para transformar a indústria do *denim* em uma cadeia mais eficiente, de menor impacto e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A literatura pesquisada permitiu compreender que a ACV constitui uma ferramenta essencial para a compreensão dos impactos ambientais associados à cadeia têxtil, especialmente na produção de *denim*, um dos segmentos mais poluentes do setor. Ao atender aos objetivos propostos, o estudo demonstrou que os maiores impactos ambientais concentram-se nas etapas de cultivo do algodão e tingimento com corantes à base de índigo, que demandam elevados volumes de água, produtos químicos e energia, além de gerarem efluentes complexos e de difícil tratamento.

A partir da identificação e avaliação das etapas críticas do ciclo de vida do *denim*, foi possível verificar que a adoção de práticas mais limpas e eficientes, como o uso de matérias-primas renováveis, tingimento com alternativas menos tóxicas e processos industriais de baixo consumo hídrico, representa um caminho concreto para reduzir significativamente a pegada ambiental do setor. Além disso, a integração de estratégias de bioeconomia e economia circular, como o reaproveitamento e a reciclagem de fibras têxteis, mostrou-se uma oportunidade real de prolongar a vida útil dos materiais e gerar valor econômico a partir de resíduos que, tradicionalmente, seriam descartados.

Outro ponto importante refere-se aos padrões de consumo, que exercem influência direta sobre a produção e a destinação final dos produtos. Incentivar o consumo consciente, o reuso e a logística reversa pode reduzir o volume de resíduos e contribuir para a regeneração dos ecossistemas afetados.

Como sugestão, recomenda-se que futuros estudos avancem na análise quantitativa da ACV aplicada ao *denim*, com dados primários do setor produtivo nacional, de modo a fortalecer políticas públicas e práticas empresariais voltadas à sustentabilidade. Além disso, a ampliação de incentivos fiscais e tecnológicos voltados para a circularidade e a bioeconomia pode acelerar a transição para um modelo têxtil mais limpo, eficiente e socialmente responsável. Acreditamos que essa abordagem integrada representa não apenas uma resposta às pressões ambientais e regulatórias, mas também uma oportunidade estratégica de inovação e competitividade para o setor têxtil brasileiro.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **Brasil descarta 4 milhões de toneladas de resíduos têxteis por ano**, 1 abr. 2025. Disponível em:

<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2025-04/brasil-descarta-4-milhoes-de-toneladas-de-residuos-texveis-por-ano>. Acesso em: 13 out. 2025.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL- ABDI. **Economia Circular no Brasil**: oportunidades e desafios para a indústria têxtil e de confecção. Brasília: ABDI, 2021. Disponível em:

<https://orizonvr.com.br/economia-circular-no-brasil-oportunidades-e-desafios>. Acesso em: 13 out. 2025.

ALCÂNTARA, M. R.; DALTIN, D. A química do processamento têxtil. **Química Nova**, São Paulo, v. 19, n. 3 , p. 320-30, 1996. Disponível em:

https://quimicanova.sbj.org.br/detalhe_artigo.asp?id=4115. Acesso em: 13 out. 2025.

ALMEIDA, E. J. R.; DILARRI, G.; CORSO, C. R. A indústria têxtil no Brasil: Uma revisão dos seus impactos ambientais e possíveis tratamentos para os seus efluentes. **Boletim das Águas**, s.l., edição 2016. Disponível em:

<https://conexaoagua.mpf.mp.br/boletim-das-aguas/edicao-2016> Acesso em: 9 out. 2025

AMARAL, M. C. **Reaproveitamento e reciclagem têxtil no Brasil**: ações e prospecto de triagem de resíduos para pequenos geradores. 2016, 123 f. Dissertação (Mestrado em

Ciências) – Universidade de São Paulo, 2016. Disponível em:

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100133/tde-11112016-104321/publico/Mariana_Amaral_final.pdf Acesso em: 9 out. 2025

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO - ABIT.

Perfil do setor têxtil e de confecção no Brasil 2023. São Paulo: ABIT, 2024. Disponível em: <https://www.abit.org.br/cont/perfil-do-setor> Acesso em: 25 set. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO - ABIT.

Têxtil: alta na produção em 2024 animou empresários para 2025. 18 fev. 2025.

<https://www.abit.org.br/noticias/textil-alta-na-producao-em-2024-animou-empresarios-para-2025>. Acesso em: 9 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO – ABIT.

Relatório Setorial 2023. São Paulo: ABIT, 2023. Disponível em:

https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/abit-files.abit.org.br/site/relat%C3%B3rio_atividades/2023/Relat%C3%B3rio+Atividades+Abit+2023.pdf?utm_campaign=relatorio_abit_2023_-_12012024&utm_medium=email&utm_source=RD+Station Acesso em: 9 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS

ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/panorama/> Acesso em: 9 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040**:

Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR 10004: Resíduos Sólidos** - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e Diretrizes. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE - ABREMA.

Panorama ABREMA: Dos resíduos sólidos no Brasil. São Paulo: Abrema, 2024a.

Disponível em:

https://www.abrema.org.br/wpcontent/uploads/dlm_uploads/2024/03/Panorama_2023_P1.pdf
Acesso em: 13 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE - ABREMA. **Pesquisa aponta que 80% dos têxteis descartados não são reaproveitados.** 27 jun, 2024b.

<https://www.abrema.org.br/2024/06/27/pesquisa-aponta-que-80-dos-texteis-descartados-nao-sao-reaproveitados/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE ALGODÃO - ABRAPA. **Relatório Anual 2023.** Brasília, ABRAPA, 2023. Disponível em:

<https://abrapa.com.br/wp-content/uploads/2025/01/Relatorio-da-safra-2023-2024-ABR.pdf>
Acesso em: 13 out. 2025.

ATHEY, S. N.; ADAMS, J. K.; ERDLE, L. M.; JANTUNEN, L. M.; HELM, P. A.; FINKELSTEIN S. A.; DIAMOND M. L. The Widespread Environmental Footprint of Indigo Denim Microfibers from Blue Jeans. **Environmental science & technology letters**, Washington, v. 7, n. 11, p. 840–847, 2020. Disponível em: 10.1021/acs.estlett.0c00498
Acesso em: 20 set. 2025.

BARE, J. C. TRACI 2.0: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts 2.0. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 13, n. 5, p.687-696. Disponível em: DOI:10.1007/s10098-010-0338-9 Acesso em: 20 set. 2025.

BECHTOLD T.; PHAM T. **Textile chemistry**, 2st ed. Berlin: Walter de Gruyter GmbH: 2023. v. 1.

BECKERT, S. **Empire of cotton: a global history**. New York: Vintage Books, 2014.

BEHERA, B. K.; HARI, P. K. **Woven textile structure: theory and applications**. London: Publishing Limited, 2010.

BENNEMANN, P. A. P.; ALPERSTEDT, G. D. Análise de relatório de sustentabilidade – empresa Dusalina. SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 26., Santa Catarina [Anais...]. Santa Catarina, UDESC, 2022. Disponível em:
https://www1.udesc.br/arquivos/id_submenu/2560/analise_de_relatorio_de_sustentabilidade_empresa_dusalina.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

BERLIM, L. **Moda e sustentabilidade: uma reflexão necessária**. Barueri: Estação das letras e cores, 2012.

BETTER COTTON INITIATIVE - BCI. **Annual Report 2023**. Londres, 2023. Disponível em: <https://bettercotton.org/who-we-are/annual-report/> Acesso em: 15 set. 2025.

BEZERRA, F. D. Análise retrospectiva e prospectiva do setor têxtil. Informe macroeconomia, indústria e serviços. **Informe técnico do escritório técnico de estudos econômicos do Nordeste – ETENE**. Banco do Nordeste, v. 2, n. VIII, 2014.

BOCKEN, N. M. P.; PAUW, I. C.; BAKKER, C.A.; VAN DER GRINTEN, B. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of Industrial and**

Production Engineering, London, v. 33, n. 5, p. 308–320, 2016. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21681015.2016.1172124> Acesso em: 12 ago. 2025.

BOSTON CONSULTING GROUP - BCG. **From waste to worth: fashion's opportunity to reclaim up to \$150 billion in lost textile value a year.** 12 aug, 2025. Disponível em: <https://www.prnewswire.com/news-releases/from-waste-to-worth-fashions-opportunity-to-reclaim-up-to-150-billion-in-lost-textile-value-a-year-302527005.html>. Acesso em: 18 out. 2025.

BOSTON CONSULTING GROUP. **From waste to worth: fashion's opportunity to reclaim up to \$150 billion in lost textile value a year.** 2024. Disponível em: <https://www.prnewswire.com/news-releases/from-waste-to-worth-fashions-opportunity-to-reclaim-up-to-150-billion-in-lost-textile-value-a-year-302527005.html>. Acesso em: 16 out. 2025.

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. 18ed., São Paulo: CETESB, 1993.

BRASIL. Senado Federal. Presidência da República. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 18 out. 2025.

BRAUNGART, M.; McDONOUGH, W. **Recycling is good, isn't it?** New York: Random House, 2009. 208 páginas

BURKE, S.; SINCLAIR, R. Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Manufacturing (CAM) of apparel and other textile products. In: SINCLAIR, R. (Ed.). **Textiles and fashion: materials, design and technology**. Cambridge: Woodhead Publishing Series in Textiles, 2015. p. 671-703.

CAMARGO, L. H. **Processos de beneficiamento e fiação do algodão**. 2019. 36 f. Trabalho de conclusão de curso (Curso de Tecnologia em Produção Têxtil)-Faculdade de Tecnologia de Americana, Americana, 2019. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/371> Acesso em: 12 ago. 2025.

CARVALHO, L. **Impactos ambientais causados pela indústria têxtil no Brasil**. 2024. 56f, Monografia (Curso Superior de Tecnologia em Produção Têxtil)-Faculdade de Tecnologia de Americana Ministro Ralph Biasi – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2024.

CATOIRA, L. **Moda: entre o sonho e a realidade**. Rio de Janeiro: Senac Nacional, 2009.

CATOIRA, L. **O jeans: uma roupa que conquistou o mundo**. Rio de Janeiro: Senac Nacional, 2006.

CECHIN; A. D.; VEIGA, J. E. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. **Revista de Economia Política**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 438-454, jul.-set. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/9kg74rTdHZSLbBrdgRtX53Q/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 20 set. 2025.

CHEN, F., JI, X.; CHU, J.; XU, P.; WANG, L. A review: life cycle assessment of cotton textiles. **Industria Textila**, Romenia, v. 72, n. 1, p. 19-29, 2021. Disponível em: DOI: 10.35530/IT.072.01.1797 Acesso em: 9 out. 2025.

COELHO, J. D. **Algodão: Produção e Mercados**. **Caderno Setorial Etene**, Fortaleza, v. 7, n.

226, maio 2022. Disponível em:
<https://www.bnb.gov.br/revista/cse/article/download/2823/1925/9460> Acesso em: 9 out. 2025.

COLCHESTER, C. **Textile design: principles, advances and applications.** Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Avaliação dos impactos ambientais do setor têxtil:** processos produtivos, consumo de água e energia. São Paulo: CETESB, 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br> Acesso em: 9 out. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira:** Grãos. Safra 2021/22. 7º Levantamento. v. 9, abril de 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. **Integração da biodiversidade aos negócios:** recomendações e mapeamento de ferramentas. Brasília : CNI, 2024. Disponível em:
https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/9a/04/9a0483fb-12d1-462b-8afa-9f2a7af1884d/id_248165_integracao_da_biodiversidade_interativo.pdf Acesso em 12 out. 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **O setor têxtil e de confecção e os desafios da sustentabilidade.** Brasília : CNI, 2017. Disponível em:
https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/bb/6f/bb6fdd8d-8201-41ca-981d-deef4f58461f/abit.pdf Acesso em: 20 ago. 2025.

CONSTA, S.R.; BUENO, M.G. **A saga do algodão:** das primeiras lavouras à ação na OMC. Rio de Janeiro: Insight Engenharia, 2004.

DALILA TÊXTIL. **Linha reciclado:** processos sustentáveis para tingimento têxteis a base de pigmentos reciclados. 2023. Disponível em:
<https://www.dalilatextil.com.br/linha-renova/reciclado/> 2023. Acesso em: 13 out. 2025.

ELAHI, S.; HOSEN, D.; ISLAM, M.; HASAN, Z.; MAZHARUL HELAL, M.; SAITHAM A, S.; RAKIN, S. Analysis of physical & chemical properties of cotton-jute blended denim after a sustainable (industrial stone enzyme) wash. **Journal of Textile Science & Fashion Technology - JTSFT**, San Francisco, n.3.p; 1-8, 2019. Disponível em:
<https://doi.org/10.33552/JTSFT.2019.03.000558> Acesso em 12 out, 2025.

ELIA, L. **Reciclagem é uma boa oportunidade à indústria têxtil da Europa.** 17 set.2025. Disponível em:
<https://sinditextilsp.org.br/home/2025/09/reciclagem-e-oportunidade-a-industria-textil-da-europa/> Acesso em: 10 out. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A New Textiles Economy:** redesigning fashion's future. cowes: EMF, 2017. Disponível em:
<https://ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy>. Acesso em: 18 out. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **A new textiles economy:** redesigning fashion's future. 27 nov. 2017. Disponível em:
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy> Acesso em: 13 out. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular business models: Redefining growth for a thriving fashion industry.** 2021. Disponível em:
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/news/circular-business-models-in-the-fashion-industry> Acesso em: 15 out. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA.

Sustentabilidade na produção de algodão no Brasil: desafios e oportunidades. Brasília: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br> Acesso em: 13 out. 2025.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **National overview:** facts and figures on materials, wastes and recycling. 11sep. 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials#Trends1960-Today> Acesso em: 15 out. 2025.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Textiles:** Material-Specific Data. 8 nov. 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/textiles-material-specific-data> Acesso em: 15 out. 2025.

ESTEVÃO, I. M. Pesquisa aponta que 80% dos têxteis descartados não são reaproveitados, 26 jun. 2024.

<https://www.metropoles.com/columnas/ilca-maria-estevao/pesquisa-aponta-que-80-dos-texteis-descartados-nao-sao-reaproveitados> Acesso em: 13 out. 2025.

EU RECICLO TECIDOS. **Relatório Anual de desempenho 2024.** Disponível em: https://info.eureciclo.com.br/relatorio_desempenho2024 Acesso em: 13 out. 2025.

EURATEX. **ReHubs initiative – circulating textile waste into value.** European Apparel and Textile Confederation, 2023. Disponível em: <https://euratex.eu/139/rehubs-2022-circulating-textile-waste-into-value/>. Acesso em: 16 out. 2025.

EUROPEAN COMMISION. **Environmental footprint.** Disponível em: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>? 20 set. 2025.

EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTRE - EC-JRC. **ILCD Handbook:** Framework and Requirements for LCIA Models and Indicators. Italy: European Commission – Joint Research Centre, 2011. Disponível em: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-Requirements-ONLINE-March-2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf> Acesso em: 13 out. 2025.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA. Textiles and the environment: the role of design in Europe's circular economy. 12 Aug 2025. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/textiles-and-the-environment-the-role-of-design-in-europes-circular-economy-1> Acesso em: 13 out. 2025.

FABIANIS, C.; FERRETI, M.; ROCCA, R. **Blue jeans:** história e cultura de um ícone global. São Paulo: Estação das Letras e Cores, 2014.

FAUSTO, B. **História concisa do Brasil.** São Paulo: Edusp, 2022.

FERREIRA, Alexandre Lessa. **Da revolução industrial e suas consequências:** um breve histórico sobre a indústria têxtil no Brasil e em Alagoas. 2023. 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em História) – Instituto de Ciências Humanas, Comunicação e Artes, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2022. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/10648> Acesso em: 13 out. 2025.

FIALHO, P. O. **Setor de confecção têxtil e resíduos sólidos o Brasil.** 2014 109 F. Dissertação(Mestrado)- .Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.ie.ufrj.br/images/IE/PPED/Dissertacao/2024/24.09>. Acesso em:

12 out. 2025.

FRANSEN, T. **Entenda o que significa o limite de 1,5°C, crucial para o aquecimento global.** 8 jul 2025. Disponível em:

<https://www.wribrasil.org.br/noticias/entenda-o-que-significa-o-limite-de-15c-crucial-para-o-aquecimento-global> Acesso em: 13 out. 2025.

GAUTAM, T. ; PRIYA , M. S. ; PRIYA, S. S. Life Cycle assessments of textile products: a study related to evaluating the environmental impact of production, use, and disposal.

Journal of Informatics Education and Research, v. 4, n. 2, 2024. Disponível em:

<https://jier.org/index.php/journal/issue/view/9> Acesso em: 10 out. 2025.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 7ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GOEDKOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The Eco-indicator 99:** A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment. 3th. Netherlands: PRÉ Consultants, 2001. Disponível em: https://pre-sustainability.com/wp-content/uploads/2013/10/EI99_methodology_v3.pdf Acesso em: 10 out. 2025.

GOMES, R.; STRACHMAN, E.; PIERONI. J. P. SILVA, A. O. Abertura comercial, internacionalização e competitividade: a indústria brasileira de máquinas têxteis após os anos 1990. **Economia e Sociedade**, Campinas, v. 16, n. 3 (31), p. 405-433, dez. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ecos/a/83nFr5RH97Skn6MZk3Q5Qx/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 24 set. 2025.

GUINÉE, J.B. **Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards.** London: Springer, 2002. p. 311–313.

HAQUE, E.; RAHMAN, B. ; KAFI, W. ; KAISER, S.U. ; DEY, A. Minimization of air consumption and potential savings of textile denim fabric manufacturing process. **Journal of Textile Science and Technology**, India, n. 9, p. 69-83, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/jtst.2023.91005> Acesso em: 22 out. 2025.

SMITHERS, P. **How cutting room technology is transforming the textile industry.** May 11, 2025. Disponível em: <https://vetigraph.co.uk/how-cutting-room-technology-is-transforming-the-textile-industry/> Acesso em: 22 out. 2025.

HARLAPUR, S. F.; SREENIVASAIAH, V. Effect of enzyme washing on properties of denim fabric. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, India, v. 6, n. 12, Dec. 2017. Disponível em: DOI: 10.17577/IJERTV6IS120021 Acesso em: 15 out. 2025.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L. A review of energy use and energy efficiency technologies for the textile industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 16, p. 3648–3665, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.029> Acesso em: 10 out. 2025.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L. A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry. **Journal of Cleaner Production**, Estados Unidos, v. 95, p. 30-44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.079> Acesso em: 10 out. 2025.

HETHORN, J.; ULASEWICZ, C. Sustainable Fashion: What's Next? A Conversation about Issues, Practices, and Possibilities. 2. ed. New York: Fairchild Books, 2018.

HKRITA. GREEN MACHINE PROJECT. **Hong Kong Research Institute of Textiles and Apparel**, 2023. Disponível em:
https://storage.googleapis.com/prod-enra-app/media/uploads/2023/09/18/9.50_Martinez.pdf. Acesso em: 16 out. 2025.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. UK: Earthscan, 2011. Disponível em:
https://waterfootprint.org/resources/TheWaterFootprintAssessmentManual_English.pdf Acesso em: 12 out. 2025.

HOLKAR, C. R.; JADHAV, A. J.; PINJARI, D. V.; MAHAMUNI, N. M.; PANDIT, A. B. A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, London, v. 182, p. 351–366, 2016. Disponível em:

HSU T. M.; WELNER D. H.; RUSS Z. N.; CERVANTES B.; PRATHURI R. L.; ADAMS P. D.; DUEBER J. E. Employing a Biochemical Protecting Group for a Sustainable Indigo Dyeing Strategy. *Nature Chemical Biology*, New York, v. 14, n. 3, p. 256–261. Disponível em: 10.1038/nchembio.2552 Acesso em: 12 out. 2025.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090> Acesso em: 12 out. 2025.

HUIJBREGTS, M. A. J.; ZORAN J. N.; STEINMANN, P. M. F.; ELSHOUT, G. S.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; VAN ZELM, R. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, The Netherlands, v. 22, p.138–147, 2017.

INSECTA SHOES. **Relatório de Sustentabilidade 2024**. Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://www.insectashoes.com> Acesso em: 12 out. 2025.

INSTITUTO LIXO ZERO BRASIL. **Relatórios e projetos**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://institutolixozerobrasil.com.br>, Acesso em: 10 out. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14040:2006: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**. Geneva: ISO, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 14044:2006 – Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines**. Geneva: ISO, 2006.

INTERNATIONAL TEXTILE MANUFACTURERS FEDERATION – ITMF. **Annual Report 2022**. Zurich: ITMF, 2022. Disponível em:
https://www.itmf.org/component/breezingforms/ff_name/annual_conference_report_2022_request_form/lang/en-EN.html Acesso em: 10 out. 2025.

INTERNATIONAL TEXTILE MANUFACTURERS FEDERATION - ITMF. **ITMF Annual Report 2022**. Zürich: ITMF, 2022. Disponível em: <https://www.itmf.org/> Acesso em: 22 out. 2025.

JINAN MORINTE. **Textile waste cotton recycling machine**. Disponível em:
<https://www.textilefibermachinery.com/textile-waste-cotton-recycling-machine.html>. Acesso em: 16 out. 2025.

KADOLPH, S. J.; LANGFORD, A. L. **Fabric Science**. New York: Fairchild Books, 2010.

KHAN, M. M. R.; MONDAL, M. I. H.; UDDIN, M. Z. Sustainable washing for denim garments by enzymatic Treatment. **Journal of Chemical Engineering IEB**, Bangladesh, v. 27, n. 1, p. 27-31, 2012. Disponível em: DOI: 10.3329/jce.v27i1.15854 Acesso em: 15 out. 2025.

KHIANI, R. K.; PEERZADA, M. H.; ABBASI, S. A. Air Consumption analysis of air-jet weaving. **Mehran University Research Journal of Engineering and Technology**, Pakistan, v. , n. 3, p. 453-458, 2016. Disponível em: DOI:10.22581/muet1982.1603.15 Acesso em: 22 out. 2025.

KIRCHHERR, J.; YANG, N-H. N.; SCHULZE-SPÜNTRUP, F.; HEERINK, M. J.; HARTLEY, K. Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 194, p. 1-31, July 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344923001374> Acesso em: 10 out. 2025.

KIRON, M. I. **Slasher/ sheet dyeing process with advantages and disadvantages**. 15 sep. 2022. Disponível em: <https://textilelearner.net/slasher-dyeing-process/> Acesso em: 10 out. 2025.

KLÖPFFER, W.; GRAHL, B. **Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice**. Weinheim: Wiley-VCH, 2014.

KOSZEWSKA, M. Circular economy: challenges for the textile and clothing industry de gruyter **Autex Research Journal**, Berlim, v.18, n. 4, p. , Jul. 2018. Disponível em: DOI:10.1515/aut-2018-0023. Acesso em: 20 set. 2025.

KWOK, Y.I.L.; WONG, A. S.W.; LI, Y.I.; ZHANG, X. 20 - Sensory comfort of denim product. In: LI, Y.; WONG, A.S.W. **Clothing Biosensory Engineering**, UK: Woodhead Publishing, 2006. p. 335-349. <https://doi.org/10.1533/9781845691462.335>

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENERGIA E GEOLOGIA -LNEG. **eMaPriCE — Relatório Técnico**. Lisboa: LNEG, set. 2022. Disponível em: https://emaprice.lneg.pt/wp-content/uploads/2022/11/eMaPriCe_RelatorioSetembro2022_FIN AL.pdf. Acesso em: 18 out. 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

LAROCHE. **Textile recycling solutions**: fiber opening and defibring equipment. França: Laroche Group, 2021.

LOPES, A. P.; BARROS, M. M.; RODRIGUES, V. D. V. Pequenos negócios sustentáveis: Boas práticas na reciclagem e reutilização de resíduos têxteis. In: CONGRESSO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO DA FACULDADE SENAI, 1., 2025. São Paulo [Anais...]. São Paulo: Senai, 2025. Disponível e: <https://senaigoias.com.br/publicacoes/revista-tecnologia-da-informacao-aplicada/2025-anais-d-o-1-congresso-de-ensino-pesquisa-e-extensao-da-faculdade-senai> Acesso em: 13 out. 2025.

MALWEE. **Sustentabilidade**: Malwee avança na moda circular com nova coleção de tecidos reciclados. ELLE Brasil, 10 jun. 2024. Disponível em: <https://elle.com.br/moda/sustentabilidade-malwee-modas-circular>. Acesso em: 13 out. 2025.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo,

2016.

MONTEIRO, S. N.; GOMES, C. M. **Desafios para a aplicação da avaliação do ciclo de vida no Brasil**. CETEM/MCTI, 2011.

MORALLES, L. C. P. **Nova diretiva da União Europeia inclui têxteis na responsabilidade estendida do produtor**. 7 out. 2025. Disponível em:
<https://www.fius.com.br/nova-diretiva-da-uniao-europeia-inclui-texteis-na-responsabilidade-e-stendida-do-produtor/> Acesso em: 16 out. 2025.

MORITA, A. M. **Avaliação de impactos ambientais do setor têxtil por meio da ACV (avaliação do ciclo de vida) estudo de caso: calça jeans**. 2013. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Maringá, 2013, Maringá, PR, 2013. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/6655?mode=full> Acesso em: 10 set. 2025.

MUTHU, S. S. The textile supply chain and its environmental impact. In: MUTHU, S. S. **Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2014. p. 1-31.

NAYAK, R.; PADHYE, R. The use of laser in garment manufacturing: an overview. **Fashion and Textiles**, London, v. 3, n. 5, p. 1-16, 2016. Disponível em:
<https://doi.org/10.1186/s40691-016-0057-x> Acesso em: 22 out. 2025.

NIINIMÄKI, K., PETERS, G.; DAHLBO, H.; PERRY, P.; RISSANEN, T.; GWILT, A. The Environmental Price of Fast Fashion. **Nature Reviews Earth & Environment**, London, v. 1, p. 189–200, 2020.

NORDIC COUNCIL OF MINISTERS. **The Nordic Textile Commitment**: A proposal of a common quality requirement system for textile collection, sorting, reuse and recycling. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 2015. Disponível em:
<https://norden.diva-portal.org/smash/get/diva2:790973/fulltext01.pdf>. Acesso em: 19 out. 2025.

OLIVEIRA, E. H. C. **Absorção de corantes da indústria têxtil (indosol) em resíduos industriais (lama vermelha e argila esmectita)**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Cap. 4. Disponível em:
[file:///C:/Users/pedro/AppData/Local/Temp/Rar\\$D1a16000.41012/arquivo121_1.pdf](file:///C:/Users/pedro/AppData/Local/Temp/Rar$D1a16000.41012/arquivo121_1.pdf). Acesso em: 4 set. 2025.

OLIVEIRA, E. N. C. **Análise socioeconômica de Alagoas**: fontes e história sobre algodão e a indústria têxtil, 1850-1915. 2021. 143 f. Dissertação (Mestrado em História) – Instituto e Ciências Humanas, Comunicação e Artes, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021. <https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/10747> Acesso em: 4 set. 2025.

OLIVEIRA, T. S. Moda: Um fator social. 2013. 125 f. Dissertação (Mestre em Ciência Têxtil e Moda)-Escola de Artes Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD. **The Bioeconomy to 2030**: Designing a policy agenda. Paris: OECD, 2009. Disponível em:
https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2009/04/the-bioeconomy-to-2030_g1gha07e/9789264056886-en.pdf Acesso em 12 out. 2025.

PASSUELLO, A. C. B.; OLIVEIRA, A. F.; COSTA, E. B.; KIRCHHEIM, A. P. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clíqueres alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7–20, out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400002> Acesso em: 9 out. 2025.

PATRA, A. K.; MADHU, A.; BALA, N. Enzyme washing of indigo and sulphur dyed denim. **Fashion and Textiles**, Korean, v. 5, art. 3, 2018. Disponível em: DOI: 10.1186/s40691-017-0126-9. Acesso em: 15 out. 2025.

PEIXOTO, J. P.; COSTA, G. M. O.; STEFANI, S. R.; SANTOS, P.; FERREIRA, D. A escassez das matérias-primas tem implicações diretas no risco da atividade de uma empresa. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 11, n. 5, p. e15211524822, 2022. Disponível em: DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.24822> Acesso em: 9 out. 2025.

PERALTA, T.; PAULO, N. Estudo de caso dos resíduos sólidos do denim e seus impactos ambientais. **Revista Arte 21**, São Paulo, volume22, número1, p. 6-23, jan-jun, 2024. <https://revistas.belasartes.br/arte21/article/view/460/473> Acesso em: 9 out. 2025.

PEREIRA, G. S. **Introdução à tecnologia têxtil**. Aranguá: CEFET/SC, 2013.

PERIYASAMY A. P. Evaluation of Microfiber Release from Jeans: The Impact of Different Washing Conditions. **Environmental Science and Pollution Research**, Berlin, v. 28, p. 58570- 82, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-14761-1> Acesso em: 15 out. 2025.

PERIYASAMY A. P.; TEHRANI-BAGHA A. A Review on Microplastic Emission from Textile Materials and Its Reduction Techniques. **Polymer Degradation and Stability**, London, v. 199, p. 109901, 2022. Disponível em: [10.1016/j.polymdegradstab](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2022.109901) Acesso em: 15 out. 2025.

PERIYASAMY A. P.; WIENER J.; MILITKY J. life-cycle assessment of denim. In: MUTHU, S. S. (Ed). **Sustainability in denim**. London: Elsevier, 2017. p. 83–110.

PERIYASAMY AP, PERIYASAMI S. Critical Review on Sustainability in Denim: A Step toward Sustainable Production and Consumption of Denim. **ACS Omega**, Washington, v. 13, v. 8, n. 5, p. 4472-4490, 2023. Disponível em: Doi: [10.1021/acsomega.2c06374](https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06374). Acesso em: 13 out. 2025.

PERIYASAMY, A. P. Environmental hazards of denim processing-I. **Asian Dyer**, India, v. 17, n. 1, p. 56-60, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Aravin_Prince_Periyasamy/publication/342353695_Environmental_hazards_of_denim_processing_-I/links/5ef05e6e458515814a74a01c/Environmental-hazards-of-denim-processing-I.pdf Acesso em: 15 out. 2025.

PETTENATI. **Eco3 Sustentabilidade**. 2023. Disponível em: <https://www.pettenati.com.br/campanhas/eco3-sustentabilidade/>. Acesso em: 13 out. 2025.

PETTENATI. **Relatório de Comunicação de Progresso 2022-2023**. 2025. Disponível em: https://www.pettenati.com.br/wp-content/uploads/2025/03/RELATORIO-GRI-PETTENATI-2023_.pdf. Acesso em: 13 out. 2025.

PEZZOLO, D. B. **Tecidos**: história, tramas tipos e uso. São Paulo: Senac, 2019.

PUKET. **Projeto Meias do Bem**: Relatório de Impacto. São Paulo: Puket, 2021. Disponível em: <https://www.meiasdobem.com.br/> Acesso em: 13 out. 2025.

QINGDAO JINYING. Cloth leftover textile polyester fabric cotton waste recycling opening machine. Disponível em: <https://qdjinying.en.made-in-china.com/product/jONTWtZDnRpf/China-Cloth-Leftover-Textile-Polyester-Fabric-Cotton-Waste-Recycling-Opening-Machine.html>. Acesso em: 16 out. 2025.

RAHIM, A.; RAHMAN, S.; UDDIN, A. J. Low-bagging (growth) stretch denim yarn production by spinning optimization of cotton-wrapped dual-core elastane and T400 multifilament. **Heliyon**, London, v. 9, n. 3, p. e13639, 2023, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13639> Acesso em: 22 out. 2025.

RECYCLE COTTON. **Institucional**. Santa Catarina, 2024. Disponível em: <https://www.recyclecotton.com.br> Acesso em: 13 out. 2025.

RETALHAR. Gestão Responsável, INOVADORA E INCLUSIVA DE RESÍDUOS TÊXTEIS. 2024. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.retalhar.com.br> Acesso em: 13 out. 2025.

RETALHAR. Relatório de Sustentabilidade 2021. São Paulo, 2021.

REZENDE, C. C. **Proposta de ferramenta para análise comparativa de custos e impactos ambientais em pavimentos asfálticos com camadas de solo-cal e camadas granulares.** Dissertação (mestrado)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/294324> Acesso em: 16 out. 2025.

RICCI, M. R.; BATTISTI, J.F.; JONER, G. C.; POSSAN, E. Estudo da linha de produção e do arranjo físico na indústria de confecção de calça jeans. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2., Ponta Grossa, PR, 2012. **[Anais...]**. Ponta Grossa: Aprepro, 2012. Disponível em: <https://anteriores.aprepro.org.br/conbrepro/2012/anais/artigos/gestaoproducao/38.pdf>. Acesso em: 13 out. 2025.

RODRIGUES, T. O. Economia circular. In: GLOBAL MEETING, SIMPÓSIO DE ECONOMIA CIRCULAR E CADEIAS PRODUTIVAS SUSTENTÁVEIS. Brasília, 2015. **[Comunicação oral...]** Brasília: IBICT, 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=1xbMtwT2cw8> Acesso em: 18 out. 2025.

SAN-MARTIN, M. I.; ESCAPA, A.; ALONSO, R. M.; CANLE, M.; MORAN, A. **Degradation of 2-mercaptobenzothiazole in microbial electrolysis cells:** intermediates, toxicity, and microbial communities. p. 1-15. 13 May 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.06336> Acesso em: 13 out. 2025.

SANTIAGO, M. G. Influência das propriedades físicas do algodão e do poliéster na qualidade dos fios PAMP 65/35 e Ne=36/1. 2023. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Têxtil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. <https://repositorio.ufrn.br/items/0a6f06f8-ac41-49db-b859-fb8ce1865f4f> Acesso em: 13 out. 2025.

SANTISTA TÊXTIL. Sustentabilidade. 2023. Disponível em: <https://www.santistatextil.com.br>. Acesso em: 13 out. 2025.

SANTOS, B.S. **Um discurso sobre as ciências.** 16. ed. São Paulo: Cortez, 2008.

SANTOS, D. T. **Análise do ciclo de vida dos produtos açúcar & álcool em usinas sucroalcooleira no estado de Mato Grosso do Sul.** 2009. 115 f. Dissertação (mestrado) -

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Campo Grande, MS, 2009. Disponível em: <https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/364> Acesso em: 18 out. 2025.

SEVERINO, A J. **Metodologia do trabalho científico**. 25. ed. São Paulo: Cortez, 2018.

SILVA, G. M. **Expressão de enzimas de Pleurotus sp. e descoloração do corante azul índigo**. 2014. 121 f. Dissertação (Mestrado em microbiologia agrícola) - Escola superior de agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11138/tde-08042015-133119/pt-br.php>>. Acesso em: 11 out. 2025.

SILVA, Y. F. S. **Um estudo de caso na indústria têxtil para identificação precisa e análise de causa/efeito na presença de sujidade em fios e algodão**. 2023. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Têxtil) - Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/c928690e-eeb9-449d-9f1e-a644f00d54d4> Acesso em: 13 out. 2025.

STAHEL, W. The circular economy. **Nature**, UK, n. 531, p. 435–438, 2016. Disponível em : <https://doi.org/10.1038/531435a> Acesso em: 11 ago. 2025.

STAMFORD, L. Biofuels for a More Sustainable Future. In: REN, J.; SCIPTIONI, A.; LIANG, H. (Ed.) **Life cycle sustainability assessment and multi-criteria decision making**. London: Elsevier, 2020, p. 115-163.

SUSTAINABLE APPAREL COALITION. **Annual Report: A Beacon of Collective Action Towards a More Responsible Industry**. 2022. Disponível em: <https://fashnerd.com/2023/07/sustainable-apparel-coalitions-2022-annual-report-a-beacon-of-collective-action-towards-a-more-responsible-industry/>. Acesso em: 13 out. 2025.

SUSTEXMODA. **Residômetro têxtil**. 2025. Disponível em: <https://www.sustexmoda.org/residometro> Acesso em: 13 out. 2025.

TEXTILE EXCHANGE. **Materials Market Report 2024**. Disponível em: <https://textileexchange.org/app/uploads/2024/09/Materials-Market-Report-2024.pdf>. Acesso em: 13 out. 2025.

TEXTILE EXCHANGE. **Preferred fiber & materials market report 2021**. https://textileexchange.org/app/uploads/2021/08/Textile-Exchange_PREFERRED-FIBER-and-Materials-Market-Report_2021.pdf Acesso em: 13 out. 2025.

THABREW L, RIES R. Application of life cycle thinking in multidisciplinary multistakeholder contexts for cross-sectoral planning and implementation of sustainable development projects. **Integrated environmental assessment and management**, Flórida, v.5, n. 3, p. 445-60, 2009. doi: 10.1897/ieam_2008-064.1. PMID: 20050032.

THE ECONOMIST INTELLIGENCE UNIT – EIU. **Um Ecodespertar**: Medindo a consciência, engajamento e ação global para a natureza. Londres: EIU, 2021. Disponível: Acesso em: 22 set. 2025.

TRANSFORMERS FOUNDATION. **Denim Mills / Jeans Factories**. 2021. Disponível em: <https://www.transformersfoundation.org/supply-chain-actions> Acesso em: 13 out. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **Sustainability and**

circularity in the textile value chain. Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org> Acesso em: 15 out. 2025.

UNITED NATIONS. **Report of the United Nations Conference on environment and development** (Rio de Janeiro, 3–14 June 1992). New York: United Nations, 1993.

UNITED NATIONS. **Report of the United Nations Conference on the human environment** (Stockholm, 5–16 June 1972). New York: United Nations, 1973. Disponível em: <https://www.un.org>. Acesso em: 16 out. 2025.

UNITED NATIONS. **Transforming our world**: the 2030 Agenda for sustainable development. New York: UN, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda> Acesso em: 10 out. 2025.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **World agricultural supply and demand estimates (WASDE)**. Washington, D.C., 2023. 12 may 2015. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/wasde> Acesso em: 15 out. 2025.

VAN DER WERF, H. M. G. Life Cycle Analysis of field production of fibre hemp, the effect of production practices on environmental impacts. **Euphytica**, London, v. 140, p. 13-23, 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10681-004-4750-2> Acesso em: 15 out. 2025.

VOORA, V.; BERMUDEZ, S.; FARRELL, J. J.; LARREA, C.; LUNA, E. **Cotton prices and sustainability**. Sustainable commodities - marketplace series. Global Market Report, 2023. Disponível em: <https://www.iisd.org/system/files/2023-01/2023-global-market-report-cotton.pdf> Acesso em: 12 out. 2025.

WANG, Y. Fiber and textile waste utilization. **Waste Management**, Palm Bay, v. 1, n.1, p. 135-143, 2010. Disponível em: DOI:10.1007/s12649-009-9005-y Acesso em: 15 out. 2025.

WIEDMANN, T.; MINX, J. A Definition of 'Carbon footprint'. In: PERTSOVA, C. **Ecological economics research trends**: Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA. https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=599 ecological economics research trends. Hauppauge NY: Nova Science Publishers, 2008. p. 1-11, USA. Disponível em: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=5999 Acesso em: 10 set. 2025.

WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B. Um panorama sobre avaliação de ciclo de vida com base nos anais do simpósio de engenharia de produção. **Revista Gestão Industrial**. Paraná, v. 8, n. 1, p. 199-218, 2012. Disponível em: D.O.I.:10.3895/S1808-04482012000100010 Acesso em: 15 out. 2025.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

WWF-BRASIL. **Desenvolvimento sustentável**. 17 maio 2023. Disponível em: https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/conceitos/_desenvolvimentosustentavel/ Acesso em: 16 out. 2025.

YU, Z.; YANG, Y. Carbon footprint of global cotton production. **Resources Environment and Sustainability**, London, v. 20, n. 1, p. 100214, 2025. Disponível em: DOI:10.1016/j.resenv.2025.100214. Acesso em: 20 set. 2025.

ZAHARIA, C.; SUTEU D.; MURESAN A; MURESAN R.; POPESCU A. Tratamento de

águas residuais têxteis por oxidação homogênea com peróxido de hidrogênio. **Environmental Engineering and Management Jornal**, Romania, v. 8, n. 6, p. 1359–1369, 2009. Disponível em: 10.30638/eemj.2009.199. Acesso em: 16 out. 2025.

ZIEGLER, D. C.; FREITAS, S. F.; MONTEIRO, G. C. P. Contribuições do design para a sustentabilidade no desenvolvimento de produtos com resíduos têxteis por empreendedores da economia criativa e circular. In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO, 13., Florianopolis, 2025. **[Anais...]** Florianopolis, SC: UFSC, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/267032> Acesso em: 16 out. 2025.

ZONATTI, W. F. **Geração de resíduos sólidos da indústria têxtil e de confecção**. 2016, 250 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/100/100136/tde-26042016-192347/publico/CorrigidaWeltonZonatti.pdf> Acesso em: 16 out. 2025.