

Aqui Tem Química: Parte XV. Fibras Naturais Biodegradáveis e seus Tecidos

There is Chemistry Here: Part XV. Biodegradable Natural Fibers and their Fabrics

Acácio Silva de Souza,^{*a}  Patricia Garcia Ferreira,^a Vitor Francisco Ferreira^{*a} 

^aUniversidade Federal Fluminense, Faculdade de Farmácia, Laboratório de Inovação em Química e Tecnologia Farmacêutica, CEP 24241-000, Niterói-RJ, Brasil

*E-mail: vitorferreira@id.uff.br; acaciosouza@id.uff.br

Submissão: 31 de Julho de 2025 – Aceite: 10 de Fevereiro de 2026 – Publicado online: 24 de Fevereiro de 2026

Chemistry plays a central and irreplaceable role in the constitution and functionality of textile fabrics, whether of natural or synthetic origin. Each stage of the life cycle of fabrics is intrinsically related to fundamental principles of Chemistry, with intermolecular bonds defining the physical properties of fibers to the chemical processes used in their modification and dyeing. This article aims to discuss the chemical aspects of the main natural fibers used in the manufacture of sustainable fabrics. All human beings make use of fabrics in their clothing, whether natural or synthetic, making this commercial activity international and extremely relevant to the global economy. It is worth mentioning that this work will not address the dyeing processes with natural or synthetic dyes, nor the structures and methods of preparation of these dyes.

Keywords: Fabric; natural fiber; celulosic fiber; sustainability; environment.

Das fibras nascem os tecidos, que se vestem de arte e criatividade. Mas sua beleza se esvai se forem tecidas à custa do planeta.

1. Introdução

Este artigo integra a série de artigos *Aqui Tem Química*, que se propõe a refletir sobre os múltiplos aspectos da presença da Química em nosso cotidiano, alguns visíveis, outros discretamente ocultos.

Desde os primórdios da humanidade os tecidos estiveram associados ao vestuário, desempenhando a função de proteção como uma “segunda pele” contra as intempéries e insetos, confeccionados com fibras naturais de origem vegetal ou animal. Com o passar do tempo, os métodos de tecelagem se aperfeiçoaram e os tecidos se diversificaram, não apenas em termos de uso, mas também quanto aos materiais, passando a incluir fibras naturais, fibras naturais modificadas, fibras totalmente sintéticas e mistura de fibras.

O uso de roupas é uma necessidade, mas os tecidos sintéticos, amplamente utilizados nos dias atuais, apresentam uma elevada pegada de carbono e uma grande propensão à formação de micro e nanoplásticos, tornando-se um sério problema ambiental. Diante disso, é urgente redirecionar o foco da produção têxtil para tecidos biodegradáveis, que tendem a ganhar relevância à medida que os sintéticos,

por serem derivados de fontes não renováveis, se mostram insustentáveis frente ao avanço do colapso ambiental global. As fibras têxteis, por sua vez, oferecem um ponto de partida rico para discussões em sala de aula, permitindo abordagens experimentais sob múltiplas perspectivas.^{1,2} Neste artigo, pretende-se abordar os tipos de polímeros biodegradáveis que constituem as fibras dos tecidos, suas estruturas químicas e os corantes que modificam suas aparências.

Trata-se de um assunto extremamente complexo, dada a variedade de polímeros naturais que podem ser utilizados na fabricação de diferentes tipos de tecidos, bem como a diversidade de materiais fibrosos disponíveis para essa finalidade. Dentro desse contexto, adicionam-se as dimensões da sustentabilidade ambiental, que considera a compensação entre produtividade econômica e impacto ambiental, é uma perspectiva importante nas decisões de produtos para empresas têxteis e de vestuário.³

Os tecidos sustentáveis, além de utilizar fibras orgânicas naturais, precisam ser produzidos de forma a minimizar o impacto ambiental, ser cultivados sem pesticidas nocivos ou fertilizantes sintéticos, de corantes e acabamentos de baixo impacto, conservar recursos naturais e promover práticas trabalhistas éticas.⁴ Esses têxteis devem ser feitos usando métodos que reduzam o desperdício, o consumo de energia e o uso de água. Em resumo, o objetivo da produção têxtil sustentável é criar tecidos de alta qualidade e ecologicamente

corretos, contribuindo para a sustentabilidade do planeta onde os materiais são reutilizados e reciclados. Por essa razão, a abordagem será sintetizada, com o objetivo de oferecer uma visão geral sobre tecidos sustentáveis de interesse comercial.⁵ É importante destacar que os tecidos são indissociáveis da história humana. A dimensão ambiental da sustentabilidade, que busca equilibrar o desempenho econômico com os efeitos sobre o meio ambiente, desempenha um papel essencial nas escolhas de produtos das indústrias têxtil e de vestuário. No entanto, a avaliação dessa sustentabilidade nos produtos têxteis apresenta desafios, em razão da complexidade envolvida nos processos de fabricação e nas etapas de uso e descarte.

O mercado dos produtos têxteis é imenso e com significativos impactos socioeconômicos, ambientais e no consumo. A indústria têxtil hoje tornou-se uma empresa global, produzindo uma ampla gama de produtos usando várias fibras naturais e sintéticas que produzem tecidos, roupas e materiais têxteis. De acordo com a empresa de consultoria de mercado *Mordor Intelligence*, o tamanho do mercado global têxtil foi estimado em 774,33 bilhões de dólares para 2025 e deve crescer para 920,55 bilhões de dólares até 2030, com uma CAGR (do inglês, *compound annual growth rate*) de 3,52% durante o período de previsão (2025-2030).⁶ Porém, é importante destacar que a empresa de pesquisa Market Research Future estimou que o mercado de tecidos sustentáveis foi de 29,1 bilhões de dólares em 2023 e que a indústria de tecidos sustentáveis deve crescer para 74,8 bilhões de dólares até 2032, exibindo uma CAGR de 12,5%, estimulada, em parte, pela crescente demanda por produtos ecologicamente corretos.⁷ Apesar de roupas serem artigos de necessidade, a sua produção traz muitas desigualdades globais em termos de raça e gênero.⁸ Em um estudo na Europa Ocidental entre 1995 e 2009, foi destacada a questão dos salários dos trabalhadores e as desigualdades sociais. Os autores ressaltam que, para alcançar uma sustentabilidade mais justa e ambientalmente responsável, será necessário promover a elevação dos salários e repensar os modelos de produção e consumo atuais.⁹

A agressão ambiental causada pelo descarte de roupas usadas pode ser claramente observada no imenso “cemitério de roupas” localizado no deserto do Atacama, ao norte do Chile, próximo à cidade portuária de Iquique, a cerca de 1.800 km da capital, Santiago. Estima-se que a área ocupe aproximadamente 300 hectares, com montanhas de lixo têxtil compostas quase exclusivamente por roupas descartadas. O Chile é o maior importador de roupas usadas da América do Sul, recebendo cerca de 90% desse tipo de mercadoria na região. A maior parte dessas peças tem origem nos Estados Unidos, Europa e Ásia, sendo inicialmente destinadas a mercados de segunda mão, no entanto, uma grande parcela não é comercializada nem

reaproveitada, acabando descartada de forma irregular em áreas desérticas.¹⁰ Esse cenário evidencia os impactos ambientais e sociais da *fast fashion* e da economia linear têxtil, incluindo a poluição do solo e da água, a emissão de gases do efeito estufa durante a decomposição dos materiais sintéticos e o risco de incêndios tóxicos. Além disso, o acúmulo de tecidos compromete a biodiversidade local e expõe a necessidade urgente de modelos de consumo sustentáveis e circulares.¹¹

2. Históricos dos Têxteis

A espécie *Homo sapiens sapiens* sobreviveu por milênios utilizando fibras naturais. Os primeiros vestuários para proteção dos humanos contra as condições adversas da natureza (frio, chuva, sol e proteção contra os insetos) surgiram, aproximadamente, há 30.000 anos atrás, confeccionados a partir de polímeros naturais.¹² No início da evolução histórica dos tecidos, utilizavam-se apenas fibras naturais, com significados religiosos e culturais profundos. Seu uso se popularizou devido a propriedades como a permeabilidade ao ar, a higroscopicidade, a capacidade de liberar umidade, a ausência de efeitos alérgicos e a biodegradabilidade. Os polímeros naturais são macromoléculas produzidas por organismos vivos e muitos deles podem ser processados para a fabricação de tecidos. Inicialmente foram usadas as peles dos animais caçados, fibras vegetais (ex. linho) e animais (ex. lã). Durante milênios, as fibras naturais dominaram o comércio têxtil, já que ainda não existiam as fibras sintéticas. É importante destacar que, nesse longo período, a indústria têxtil era relativamente sustentável, utilizando matérias-primas provenientes de fontes naturais, renováveis e biodegradáveis.

As evidências das primeiras vestimentas confeccionadas com fibras surgiram durante a Idade do Bronze, entre 4.000 e 3.000 a.C., indicando a existência de roupas e acessórios feitos por sociedades antigas, como civilizações do vale do Indo, chineses, egípcios e povos da Mesopotâmia, representando marcos importantes no desenvolvimento e uso de roupas, bem como na evolução das técnicas de confecção ao longo dos séculos.¹³ Com o advento da tecelagem, que envolve as práticas de fiar, tecer e tingir fibras naturais, a confecção de vestimentas deixou de ser apenas um recurso de proteção contra as intempéries ambientais para transformar-se em uma complexa forma de linguagem cultural. Cobrir o corpo passou a constituir um gesto simbólico, carregado de significados sociais, estéticos, mitológicos, morais e, em muitos contextos, espirituais. Essa manifestação tipicamente humana consolidou-se como uma expressão artística que, ao mesmo tempo, respondia às demandas funcionais e comunicativas das sociedades. Desde então, o mundo inteiro tem se rendido às

dinâmicas da moda, que permanece orientada por interesses econômicos em constante transformação, buscando, até os dias atuais, a maximização do lucro.

Dentro desse contexto, historicamente, as vestimentas produzidas com produtos têxteis desempenharam um papel fundamental na diferenciação social, expressando distinções de classe, gênero, ocupação e posição hierárquica. Na Antiguidade, por exemplo, determinadas cores eram aplicadas aos tecidos, como a cor púrpura, eram exclusivas das elites imperiais; durante a Idade Média tecidos luxuosos eram privilégio da nobreza, enquanto os estratos mais baixos da sociedade vestiam materiais rústicos e simples; na era Contemporânea, peças como o terno passaram a simbolizar o poder e a respeitabilidade da burguesia.¹⁴ Assim, o vestuário consolidou-se como um sistema não verbal de comunicação, por meio do qual se manifesta não apenas a identidade social, mas também a imagem de beleza que cada indivíduo busca projetar aos demais. Os produtos têxteis também encontram aplicações em transporte, saúde, construção e muitas outras indústrias.

O mercado têxtil é composto por três tipos principais de fibras: naturais, artificiais e sintéticas. A diferença entre fibras naturais, artificiais e sintéticas está na origem das matérias-primas e no processo de produção. As fibras naturais são obtidas diretamente da natureza (plantas, animais ou minerais), sem necessidade de transformação química significativa (ex. algodão, lã, seda, juta, cânhamo e linho). As fibras artificiais são derivadas de matéria-prima natural (geralmente celulose de plantas), mas passam por processamento químico para se tornarem fibras (ex.: viscose e tencel). As fibras sintéticas são produzidas exclusivamente por processos químicos a partir de derivados do petróleo ou gás natural (ex.: náilon e elastano).¹⁵ A Tabela 1 faz um resumo das propriedades dos três tipos de fibra.

O descarte inadequado de roupas sintéticas configura-se atualmente como um grave problema de poluição ambiental, intensificado pelo consumismo característico das sociedades contemporâneas e pela baixa biodegradabilidade dos tecidos sintéticos. Essas fibras artificiais apresentam elevado potencial de fragmentação em micro e nanoplásticos, que representam uma ameaça aos ecossistemas globais. Tal padrão de produção e consumo contraria todas as dimensões

da sustentabilidade. Assim, a construção de um ambiente mais sustentável requer, necessariamente, o retorno ao uso de fibras naturais derivadas de polímeros biodegradáveis. No entanto, é importante destacar que o cultivo dessas fibras vegetais também enfrenta desafios significativos, especialmente em função de eventos climáticos extremos que comprometem sua produtividade e qualidade.¹⁶ Ademais, persistem denúncias de condições de trabalho precárias nas lavouras dedicadas à produção desses materiais, evidenciando a necessidade de uma abordagem sistêmica que considere não apenas os aspectos ambientais, mas também os sociais e econômicos.¹⁷

A história dos polímeros sintéticos é mais recente tendo crescimento vertiginoso a partir da segunda metade do século XX. À medida que Química foi avançando esses materiais tornaram-se mais sofisticados e menos biodegradáveis. Fibras sintéticas, como a viscose, o náilon e o poliéster, são obtidas nas reações de polimerização específicas, tais como, a polimerização por condensação das poliamidas como o náilon 66 (entre um diácido carboxílico e uma diamina), e poliésteres (como polietileno tereftalato entre ácido tereftálico e etilenoglicol), ou a polimerização por adição, como no caso do poliácridonitrila. A manipulação das condições reacionais, bem como a escolha dos monômeros, permite a modulação das propriedades finais da fibra, como resistência mecânica, elasticidade, permeabilidade e resistência química. No caso das poliamidas as ligações amida (-CONH-) proporcionam elevada resistência mecânica e térmica.¹⁸

Outra questão a ser abordada são as possíveis modificações químicas nas propriedades funcionais dos polímeros naturais e sintéticos. Essa área é promissora do ponto de vista comercial e tem sido objeto de milhares de estudos. Pode-se destacar as modificações causadas por ligações cruzadas com monômeros sintéticos, a inserção de nanopartículas metálicas, os sistemas de liberação controlada de substâncias bioativas, ou mesmo a modificação química das fibras para conferir propriedades antimicrobianas, autolimpantes ou condutivas. Esses são exemplos de como a Química não apenas explica, mas expande as possibilidades tecnológicas no campo têxtil. Apesar dessa parte ter muita Química, ela não será abordada extensivamente nesse artigo.

Quadro 1. Propriedades dos tipos de fibra

Fibra	Origem da Matéria-Prima	Processamento Químico	Exemplos
Fibras naturais	Plantas, animais ou minerais	Não requer transformação química significativa	Algodão, lã, seda, juta, cânhamo, linho
Fibras artificiais	Matéria-prima natural modificada quimicamente	Passam por processamento químico	Viscose, tencel
Fibras sintéticas	Derivados do petróleo ou gás natural	Produzidas exclusivamente por processos químicos	Náilon, elastano

3. Fibras Naturais

A natureza oferece muitos materiais que podem ser chamados de fibrosos. Todos eles têm uma característica comum: são 100% ecologicamente corretos, totalmente renováveis e biodegradáveis. A utilização dessas fibras se deu em diferentes regiões do mundo e em períodos distintos, mas o linho se destaca como a fibra com a evidência mais antiga de uso.¹⁹

Considerando as questões ambientais, os tecidos compostos de fibras naturais são os mais sustentáveis, pois são biodegradáveis e, portanto, deveriam dominar a indústria da moda, mas não é isso que ocorre. A produção de fibras naturais para a confecção de tecidos pode ser obtida dos sistemas agroflorestais, favorecendo a sustentabilidade ao melhorar as condições do solo, ao ampliar as fontes de renda dos produtores rurais e ao fortalecer as ações de conservação ambiental.²⁰ Além desses fatores, também há a possibilidade de melhoramento da fertilidade, promoção da biodiversidade e aumento da resiliência da agricultura frente às mudanças climáticas.²¹

Historicamente, as fibras naturais tradicionais mais utilizadas incluem fibras vegetais celulósicas (o algodão, o linho e o cânhamo) e as fibras proteicas animais (a lã e a seda).²² Essas fibras são empregadas não apenas na fabricação de tecidos destinados às roupas, mas também à decoração, aos sacos, às bolsas e sacolas, às cortinas, aos tapetes, aos sofás e estofados, às vestimentas tradicionais, além de diversas aplicações em produtos de uso doméstico. As fibras naturais renováveis continuam a desempenhar um papel relevante na indústria têxtil em razão de suas características intrínsecas. As fibras celulósicas são as mais abundantes e diversificadas tanto em fonte como em estruturas. A seguir, serão discutidas apenas as que têm maior produção e aplicação industrial e comercial (ex. linho, algodão e cânhamo). Nas fibras proteicas serão abordadas a lã e a seda, as mais importantes do ponto de vista comercial global. A Figura 1 destaca de forma resumida a classificação geral das fibras naturais.

Atualmente, muitos tecidos são produzidos a partir de misturas entre fibras naturais e sintéticas, o que acrescenta complexidade aos processos de mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte e à reciclagem desses materiais. As fibras ficam intimamente entrelaçadas e a reciclagem desses tecidos mistos representa um dos principais entraves para a sustentabilidade na indústria têxtil. A dificuldade reside, sobretudo, na heterogeneidade dos materiais, que exige processos complexos de triagem e separação das fibras constituintes.

Há outras fibras poliméricas não convencionais, também chamadas de fibras alternativas ou inovadoras, muito usadas em diversos artefatos (cordas, tapetes, cestos e artesanato). Também são biodegradáveis e contribuem

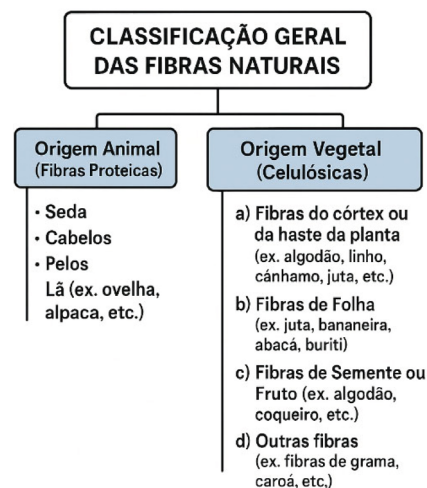


Figura 1. Classificação geral das fibras naturais

para a sustentabilidade do planeta como, por exemplos, a fibra de junco, fibra da casca externa do coco (coir), fibra de sisal, fibras de algumas plantas e esponjas aquáticas, fibra de palmeira, fibra de bambu e fibra de juta.²³ No entanto, elas não são usadas frequentemente na fabricação de roupas de uso diário. Há muitas aplicações para as fibras alternativas, principalmente devido à sua sustentabilidade, resistência e propriedades específicas. Um exemplo que consideramos marcante são as espojas de lavar louças de fibras de coco que estão substituindo com vantagens as espojas de fibra sintética.

4. Fibras Vegetais

Várias partes das plantas, como sementes, folhas, palha, fibra, núcleo lenhoso, têm potencial como fontes de fibras têxteis valiosas, também sendo adequadas para uso em indústrias automotivas e aeroespaciais, materiais de construção e biopolímeros. Os materiais celulósicos são formados majoritariamente por celulose, mas sua composição varia conforme a fonte vegetal e o grau de processamento. Além da celulose, esses materiais geralmente contêm hemicelulose, lignina e minerais.²⁴ A madeira é a fonte primária de celulose industrial (40-50% de celulose), com outras fontes sendo fibras não madeireiras (ex. bagaço de cana 40-50% de celulose), algodão (>90% de celulose) e celulose bacteriana (produzida por bactérias como *Gluconacetobacter xylinus* > 98% de celulose).²⁵

A formação de celulose pura por culturas bacterianas é um acesso interessante e atraente. Selecionando-se as condições de cultivo, os aditivos e a cepa bacteriana, é possível controlar a massa molar e a sua distribuição, bem como a estrutura supramolecular. Nesta questão deve-se destacar que as cepas da espécie *Acetobacter xylinus* produtoras da celulose extracelular que é facilmente isolada como material fibroso.²⁶

4.1. Fibras de linho

O linho é a fibra natural mais antiga conhecida para a fabricação de tecido, obtido da planta *Linum usitatissimum* (gênero *Linum*), nativa da Turquia e do Irã e que se espalhou para Europa, África e América do Sul.²⁷ Além do uso das suas fibras, a semente de linhaça é nutritiva e versátil, com diversos benefícios para a saúde, principalmente pelo seu óleo rico em fibras, ômega-3 (ex. ácido alfa-linolênico), proteínas de boa qualidade, vitaminas do complexo B e outros nutrientes.²⁷ A semente pode ser consumida inteira, triturada ou em farinha, sendo incorporada a diversos alimentos e bebidas. Outra espécie produtora de fibra é a *Linum perenne*, mas a qualidade da fibra é inferior e a produção restrita.²⁷

A manufatura do linho é antiga.²⁸ Há vestígios de que fibras de linho na caverna Dzudzuana, na Geórgia (Cáucaso), que datam aproximadamente 30.000.²⁹ As fibras foram encontradas em diferentes camadas arqueológicas, algumas delas tingidas com pigmentos naturais e trançadas, demonstrando um nível avançado de processamento intencional pelos caçadores-coletores, como fiar e torcer as fibras de linhaça, identificadas utilizando-se análises de microscopia e caracterização morfológica das fibras. As fibras de linhaça possuem características distintas, como paredes finas e translúcidas, além de segmentos que podem

ser identificados ao microscópio. Com essa domesticação e uso generalizado, o linho foi disseminado para o uso em períodos posteriores.³⁰

O tecido de linho se destaca pelo seu frescor, conforto e boa sensação ao toque, porém o ponto negativo é que amassa com facilidade. Dependendo do tratamento químico das fibras pode-se obter diferentes variedade de tecidos como pode ser visto na Figura 2, mostrando que há muita Química por trás das roupas preparadas com o tecido dessas fibras naturais. O linho é composto por fibras lignocelulósicas, principalmente por celulose (1), e sua haste pode crescer até 70 centímetros de altura, com a lignina sendo a responsável pela resistência mecânica dos caules dos vegetais.³¹ O conteúdo de celulose na fibra de linho é bastante elevado, representando cerca de 70 a 80% com uma relação de aproximadamente 17:1 entre celulose (1) e lignina (2) nas fibras de linho seca. Na preparação para o uso têxtil essas hastes passam por processos de colheita, secagem e fermentação controlada para facilitar a liberação das fibras de lignocelulose. As fibras são limpas, penteadas e fiadas para a fabricação das linhas usadas na confecção tecidos das roupas.

4.2. Fibras de algodão

O algodão é destacado como uma fibra lignocelulósica

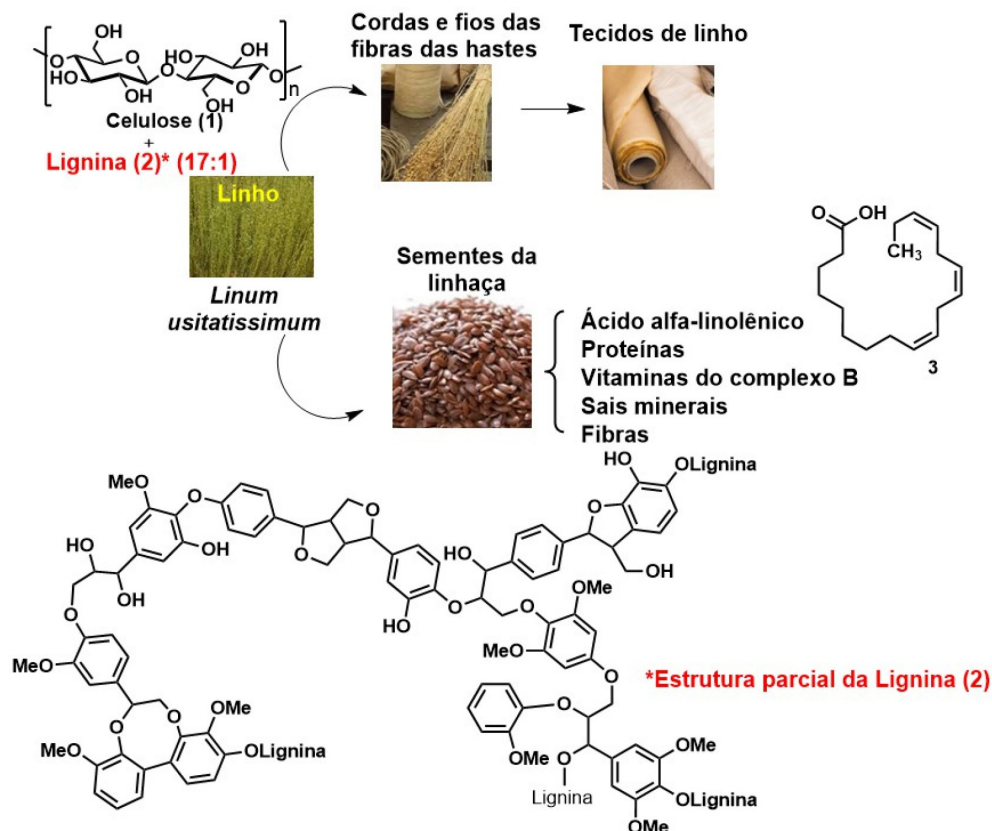


Figura 2. Detalhes sobre a estrutura e composição da fibra de linho

de origem vegetal e tem sido utilizada há milhares de anos na fabricação de tecidos, sendo um dos recursos naturais agrícolas mais antigos e prevalentes na história têxtil e amplamente cultivado e utilizado devido às suas características como a facilidade de cultivo e boas propriedades de conforto. (Figura 3).³²



Figura 3. Exemplos de produtos fabricados com algodão

Derivado de várias espécies de plantas do gênero botânico *Gossypium*, da família Malvaceae, o algodão é, atualmente, a fibra natural mais usada pelas indústrias têxteis.³³ A celulose do algodão possui uma enorme versatilidade, permitindo a confecção de muitos tecidos, como tricoline, popeline, brim, sarja, jeans, malha, e muitos outros, tornando-o adequado para diversos tipos de roupas.³⁴ Embora outras fibras naturais sejam muito utilizadas e valorizadas por suas qualidades específicas, o algodão continua a dominar o mercado têxtil global em termos de volume de produção e consumo. De acordo com a empresa de consultoria *Renub Research*, o mercado global de algodão era de 43 bilhões de dólares em 2024, mas está projetado para atingir 55,6 bilhões de dólares até 2033, com uma CAGR de aproximadamente 2,9% entre 2025 e 2033.³⁵

As fibras de algodão possuem uma superfície fina, proporcionando tecidos agradáveis ao toque e conforto no uso prolongado, com a sua estrutura fibrilar permitindo boa circulação de ar, melhor evaporação do suor e redução

da sensação de abafamento. A sua elevada capacidade de absorver umidade (até cerca de 20% do seu peso), reduz a adesão do tecido à pele. A qualidade do algodão está relacionada ao estágio de maturação das flores, onde as fibras se originam a partir de células presentes na cápsula floral. O desenvolvimento dessas fibras na planta ocorre em quatro fases principais: iniciação, formação da parede celular primária, biossíntese da parede secundária com deposição de celulose e engrossamento, e, por fim, a maturação.³⁶

A estrutura física e a composição química das fibras do algodão têm sido extensivamente estudadas a fim de ampliar seu uso no meio industrial. Para além da celulose, o restante das fibras de algodão é composto por pectinas, ceras e gorduras e proteínas, o que confere maciez e flexibilidade.³⁷ O algodão é composto predominantemente por celulose, representando cerca de 88% a 96% da massa da fibra madura, formando uma estrutura linear composta por unidades de β -D-glucopirranose unidas por ligações glicosídicas $\beta(1 \rightarrow 4)$.³⁷ O tipo de ligação β (beta) significa que o grupo hidroxila ($-\text{OH}$) no carbono anomérico (C1) da glicose está orientado para cima em relação ao plano do anel. A configuração de cada unidade de β -D-glucopirranose se conecta através de uma ligação glicosídica entre o átomo de carbono C1 de uma unidade e o átomo de carbono C4 da próxima, que se repete, formando uma longa cadeia linear não ramificada. Cada unidade sucessiva de glicose está rotacionada 180° em relação à anterior, resultando em uma estrutura estendida e rígida, ideal para a função estrutural nas paredes celulares vegetais (Figura 4).³⁷ Por meio das interações intermoleculares, especialmente pontes de hidrogênio, formam-se fibras com alta resistência e insolubilidade em água.

A estrutura tridimensional da fibra é composta por camadas de microfibrilas de celulose organizadas em espiral, envoltas por outras camadas como a cutícula, com uma disposição que influencia muito suas propriedades físicas, químicas e de qualidade.³⁸ As fibrilas estão organizadas em três camadas: a camada externa que interage com o ambiente, a parede secundária (camada média) que fornece suporte e núcleo central da fibrila (camada interna). A disposição helicoidal das fibrilas possibilita a interação com

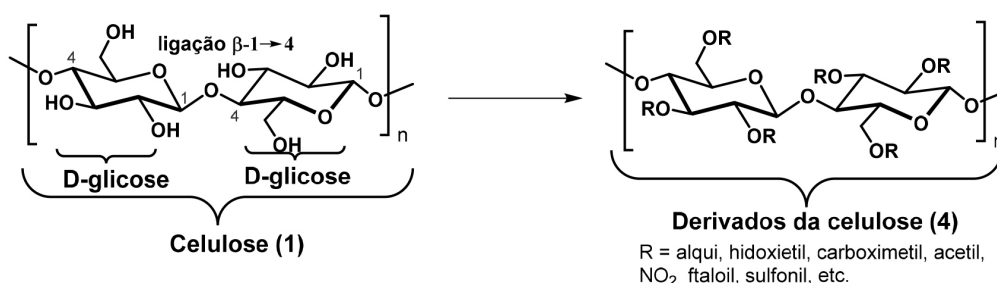


Figura 4. Celulose (1) e derivados (4)

outras fibrilas que então confere resistência, flexibilidade e determina a capacidade de enrolamento e alongamento da fibra (Figura 5). As camadas externas estão firmemente interligadas com a parede secundária, formando uma estrutura capaz de suportar tensões durante o processamento têxtil.

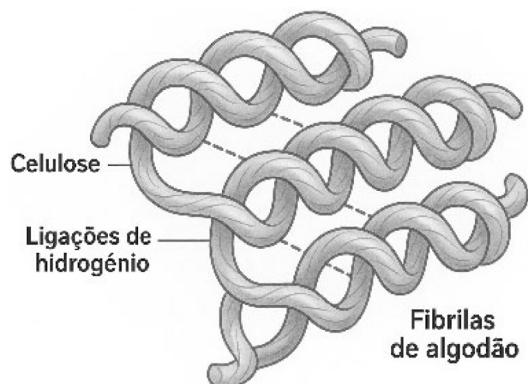


Figura 5. Fibrilas do algodão entrelaçadas

É possível modificar as microfibrilas de celulose nas fibras de algodão de muitas formas, visando melhorar propriedades físicas, facilitar o processamento ou conferir novas funcionalidades às fibras. As estratégias utilizadas para alterar a organização, o tamanho, a orientação e as interações dessas microfibrilas na parede secundária envolvem: modificação dos genes envolvidos na síntese de celulose;³⁹ tratamentos enzimático do algodão para degradação seletiva;⁴⁰ tratamentos ácidos e alcalinos, tratamento térmico e estiramento mecânico.⁴¹

Existem diversos tipos de celulose modificada quimicamente, cada um resultante da modificação dos grupos hidroxilas na estrutura da celulose com o objetivo de melhorar solubilidade, reatividade, biocompatibilidade, resistência térmica ou conferir novas propriedades. Muitos desses derivados estão no mercado para diversos fins, tais como, metilcelulose, hidroxietilcelulose, ftaloil, acetil, nitro, sufonil e fosfatil.⁴²

A exposição à luz ultravioleta (UV) é responsável por diversos problemas de saúde, incluindo o envelhecimento da pele, fotodermatose, eritema e o câncer de pele. Esse efeito da radiação UV na pele humana tem se agravado significativamente nos últimos anos devido ao esgotamento da camada de ozônio. Deste cenário, surgiu a inovação nos tecidos usados em roupas para proteção da pele com a incorporação de bloqueadores solares, que convertem a energia UV em calor, refletindo ou dispersando a radiação, além de eliminar espécies reativas geradas pela exposição UV. Para bloquear as radiações UV são utilizados compostos orgânicos e inorgânicos, como por exemplo 2-ethylhexyl-4-methoxycinnamate para bloquear os raios UVB. Materiais inorgânicos óxido de zinco (ZnO) e dióxido de titânio (TiO₂)

possuem propriedades fotocatalíticas e de absorção.⁴³ São seguros, duráveis e bastante usados nas loções cremosas de protetores solares comerciais.

O algodão não pode ser usado em tecidos com protetores para raios UV, pois não oferece proteção eficiente para essa radiação devido às suas tramas serem mais abertas. No entanto, quando nanopartículas de óxido de titânio (TiO₂) ou óxido de zinco (ZnO) são impregnadas nas fibras de algodão (“dopadas”) passam a espalhar e refletir a radiação UV. Esses óxidos são amplamente utilizados por serem estáveis, resistentes à degradação, eficazes, atóxicos e biocompatíveis. Podem ser aplicados por diversos métodos de revestimento sol-gel, cura a seco ou microencapsulação. As nanopartículas de ZnO podem se ligar aos grupos hidroxila das fibras do algodão por meio de ligações de hidrogênio, interações eletrostáticas na superfície das nanopartículas e coordenação com íons Zn²⁺ formados pela dissociação parcial de ZnO em meio aquoso. Há ainda adsorção física na superfície da fibra de algodão devido à sua alta área superficial e energia livre de superfície. Esse exemplo destacado com ZnO, apenas exemplifica as inúmeras possibilidades de inserção de diferentes nanopartículas metálicas no algodão e suas possíveis aplicações. O algodão dopado com nanomateriais à base de ZnO e TiO₂, além de fornecer proteção contra irradiação UV, tem outras aplicações que incluem tecidos antimicrobianos, fungos, micro-ondas, radiação eletromagnética, água e fogo (Figura 6).⁴⁴⁻⁴⁶

Aplicações do algodão do ado com nanopartículas metálicas



Figura 6. Aplicações do algodão contendo nanopartículas metálicas

Apesar dos produtos têxteis fabricados com o algodão virem de fontes renováveis e biodegradáveis, sua produção no campo utiliza grandes quantidades de água e agrotóxicos, causando problemas ambientais que podem impactar as decisões de negócios.⁴⁷ O cultivo do algodão é frequentemente referido como uma “cultura suja” devido ao seu impacto ambiental, pois usa até 16% da produção

global de inseticidas em menos de 3% das terras agrícolas do mundo, contaminando a água, prejudicando a biodiversidade e afetando a saúde humana.⁴⁸ Em continuidade, as indústrias têxteis que beneficiam o algodão apresentam padrões de produção com impactos especialmente relacionados à ecotoxicidade ambiental pelo uso de produtos químicos tóxicos, o alto consumo de água limpa, energia, geração de grandes quantidades de resíduos e efluentes e uso de materiais para embalagem que não são biodegradáveis.⁴⁹ A moda rápida e descartável talvez seja o mal disseminado pelas indústrias têxteis e da moda. O crescimento populacional e o consumismo irracional afetam o meio ambiente ao produzir roupas de baixa qualidade e uso de curto prazo, levando ao aumento do desperdício têxtil e da geração de lixo.^{47,50}

4.3. Fibras de cânhamo

O cânhamo (*Cannabis sativa*, família *Cannabaceae*) é uma planta herbácea, que cresce num regime anual, com fibras longas, resistentes e com ampla aplicação têxtil, utilizada tanto para roupas mais pesadas quanto para tecidos de uso cotidiano, especialmente em áreas rurais.⁵¹ Seu crescimento é rápido, com baixo impacto ambiental e dificilmente atacado por pragas, além de poder ser cultivado de três formas diferentes (ambiente interno, externo e em estufa). Suas fibras celulósicas têm propriedades mecânicas próximas às do linho, e ambos podem ser empregados na produção de tecidos de alta durabilidade. A composição das fibras varia com a espécie: celulose (55-72%), hemicelulose (10-22%), lignina (3-10%), pectinas (0,5-3%) e ceras (1-5%). Como o percentual de lignina é mais baixo sua flexibilidade e resistência são razoáveis.⁵¹

Evidências arqueológicas mostram que o cânhamo já era cultivado na China neolítica entre 8.000 a.C. - 6.000 a.C. para produção de fibras têxteis, cordas, velas de navios e tecidos rústicos para roupas resistentes.⁵² Há diversas vantagens para o uso das fibras do cânhamo na fabricação de

produtos têxteis, como alta absorção e liberação de umidade, alta permeabilidade ao ar, boa retenção de calor, resistência a altas temperaturas, propriedades antibacterianas, proteção contra UV, além de ser resistente ao mofo.⁵³

A celulose é o principal componente estrutural das fibras do cânhamo e o seu alto teor, aliado ao baixo teor de lignina, facilita o processamento e branqueamento na indústria papelreira e têxtil. Com o avanço da cultura e industrialização do algodão e o surgimento das fibras sintéticas, o cânhamo perdeu espaço econômico internacional.⁵⁴ Contudo, os impactos ambientais negativos das fibras sintéticas e o aumento da conscientização ambiental por parte dos consumidores, com a busca por materiais mais ecologicamente amigáveis, fez ressurgir o interesse pelas fibras sustentáveis renovando o interesse e a valorização pelas fibras do cânhamo.⁵⁵

O cânhamo tem uma infinidade de aplicações sendo excelente planta para ser cultivada com grande perspectiva comercial e muitos países já exportam esses produtos com boa lucratividade.⁵⁶ De acordo com a empresa de consultoria *Market Research Future* o mercado global de derivados comerciais da planta cânhamo deve atingir cerca de 56,8 bilhões de dólares em 2030, com uma CAGR de 32,3%, muito impulsionado pela variedade de produtos obtidos a partir do cânhamo, como fibra, óleo, alimentos e rações.⁵⁷

A diferença principal entre o cânhamo proibido e o cânhamo para fibras e outros fins reside no teor de tetraidrocannabinol (THC) (5), o composto psicoativo presente na planta. O cânhamo para fibras é cultivado com baixo teor de THC (normalmente inferior a 0,2%), o que o torna adequado para a produção industrial de fibras têxteis, papel, e outros materiais (Figura 8), sem efeito psicoativo. Já o cânhamo proibido, popularmente conhecido como maconha, tem alto teor de THC (acima de 0,5%), sendo considerado ilegal em muitas regiões por seu uso como narcótico.

Assim como o THC, o canabidiol (CBD) (6) é outro dos vários canabinoides extraídos da planta de cânhamo, principalmente das flores (inflorescências) mais especificamente das glândulas tricomas presentes nesta parte da planta, sendo essas glândulas responsáveis pela produção de compostos bioativos como canabinoides e terpenos (Figura 8).⁵⁸ As folhas possuem quantidades menores de canabinoides ao passo que o caule e as sementes não contêm canabinoides relevantes. As sementes, por exemplo, são usadas para produzir óleo de semente de cânhamo, que não contém essas substâncias. O CBD é a substância ativa mais usada para fins terapêuticos, principalmente por sua propriedade anticonvulsivante, anti-inflamatória, antioxidantes e antipsicótica.⁵⁸ O cigarro de maconha (ou baseado) é feito das flores secas da planta fêmea da *C. sativa*, a parte da planta onde se concentram os maiores teores de THC.⁵⁹



Figura 7. Exemplos de produtos têxteis confeccionados com fibra de cânhamo

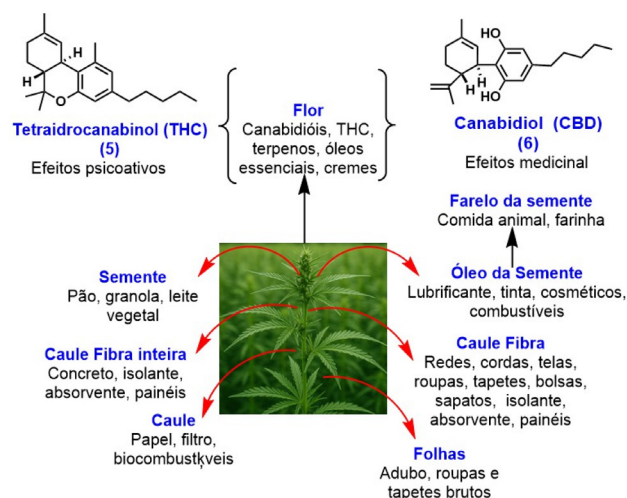


Figura 8. Diversidade de produtos que podem ser obtidos do cânhamo

5. Fibras Animais

As fibras animais são basicamente compostas por proteínas, que, por sua vez, são polímeros naturais construídos de resíduos de aminoácidos conectados por ligações peptídicas, uma ligação covalente entre o grupo amino de um aminoácido e o grupo carboxila de outro. Essa estrutura linear forma a chamada cadeia polipeptídica, cuja sequência específica de aminoácidos é determinada geneticamente e confere à proteína sua identidade e função biológica. Dentre as fibras de origem animal, as mais conhecidas e utilizadas pela indústria têxtil são a lã e a seda, apresentando características químicas, estruturais e funcionais distintas, resultando em diferentes propriedades, aplicações e valores no mercado têxtil.

5.1. Fibras de lã

A lã é uma fibra de origem animal que possui estruturas proteicas que contribuem para suas propriedades como elasticidade, isolamento térmico, elasticidade estrutural, resiliência, capacidade de retardar a propagação de chamas (ignifugação), higroscopicidade (absorve até 30% do seu peso em umidade) e características sensoriais que agradam os consumidores.⁶⁰ Essa fibra é extraída principalmente da pelagem de ovelhas (*Ovis aries*), mas também de cabras (caxemira), alpacas, lhamas e coelhos (angorá), tradicionalmente usadas na confecção de vestuário de inverno.⁶¹

Ao longo da história, os produtos elaborados a partir das fibras de lã (ou filamentos) se diversificaram, consolidando um mercado relevante de matérias-primas têxteis altamente valorizadas. A produção de lã e de produtos têxteis voltados para o vestuário de inverno movimentam um mercado global expressivo. Com as mudanças climáticas em curso, que tendem a impactar significativamente os países de clima

mais frio, é esperado um aumento na demanda por vestuário térmico, impulsionando ainda mais esse setor. Em 2024, o mercado global foi estimado em cerca de 35 bilhões de dólares, com projeções indicando que deverá atingir 47 bilhões de dólares nos próximos anos, impulsionado por uma CAGR de 3,1%.⁶²

Além do setor têxtil, a lã e seus resíduos também têm sido utilizados no isolamento térmico e acústico de edificações, na produção de materiais compósitos com matriz polimérica biodegradável e em sistemas de filtração.⁶³ Os filamentos de lã são biodegradáveis e apresentam alto grau de funcionalidade, podendo ser modificados quimicamente, tornando-os promissores para uma ampla gama de aplicações como biomateriais.⁶⁴

A lã é formada predominantemente por queratina (até 95% da sua composição), uma proteína fibrosa rica em aminoácidos, como a cisteína (7), que formam ligações dissulfeto responsáveis por sua resistência e elasticidade, e que são produzidas por células especializadas chamadas queratinócitos. A estrutura hierárquica da lã é complexa, contendo três camadas: cutícula: camada externa (escamas sobrepostas que conferem brilho e resistência à abrasão), córtex (responsável pela elasticidade e pela torção natural) e medula (canal central que pode influenciar na maciez) (Figura 9). Essa proteína também é um dos principais constituintes de estruturas externas dos vertebrados, como pele, pelos, unhas, garras, penas, escamas e cascos. A queratina aumenta a capacidade de absorver água, a resistência ao calor e a tração da lã. Existem dois tipos principais de queratinas: α -queratina com estrutura helicoidal (cabelo, lã, unhas, pele) e β -queratina com estrutura em folhas β -pregueadas (penas, escamas e bicos).⁶⁵

Outro material obtido durante a produção da lã é a lanolina (8) (Figura 10). Esse material gorduroso é exsudado pelas glândulas sebáceas das ovelhas e se acumula na lã, correspondendo de 10-25% do peso da lã tosada.⁶⁶ É um material secundário com diversas aplicações, como agente emoliente e veículo hidrofóbico em formulações cosméticas e farmacêuticas e em cremes e pomadas do tipo água/óleo, conferindo maciez e suavidade à pele, além de facilitar a absorção de princípios ativos para medicamentos de uso tópico. Produtos contendo lanolina são especialmente indicados para peles secas, não sendo recomendados para peles oleosas ou com tendência a erupções cutâneas. Uma de suas propriedades mais valorizadas é a capacidade de absorver uma quantidade de água equivalente ao seu próprio peso, o que a torna extremamente útil na formulação de emulsões.⁶⁷ A cera de lanolina tem muitos componentes químicos que podem apresentar atividades biológicas e, portanto, não é surpresa que está presente em medicamentos para cicatrização de feridas, pomadas e curativos para queimaduras e infecções

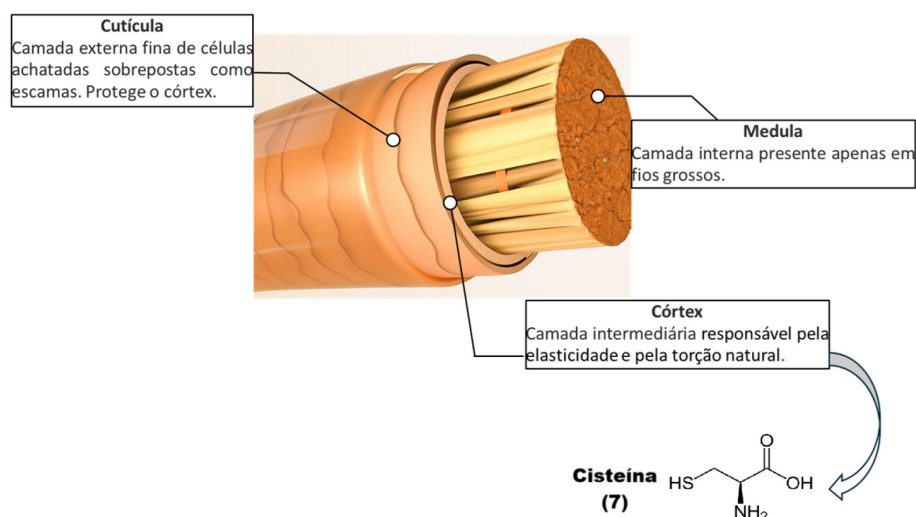


Figura 9. Estrutura do fio de lã e da queratina

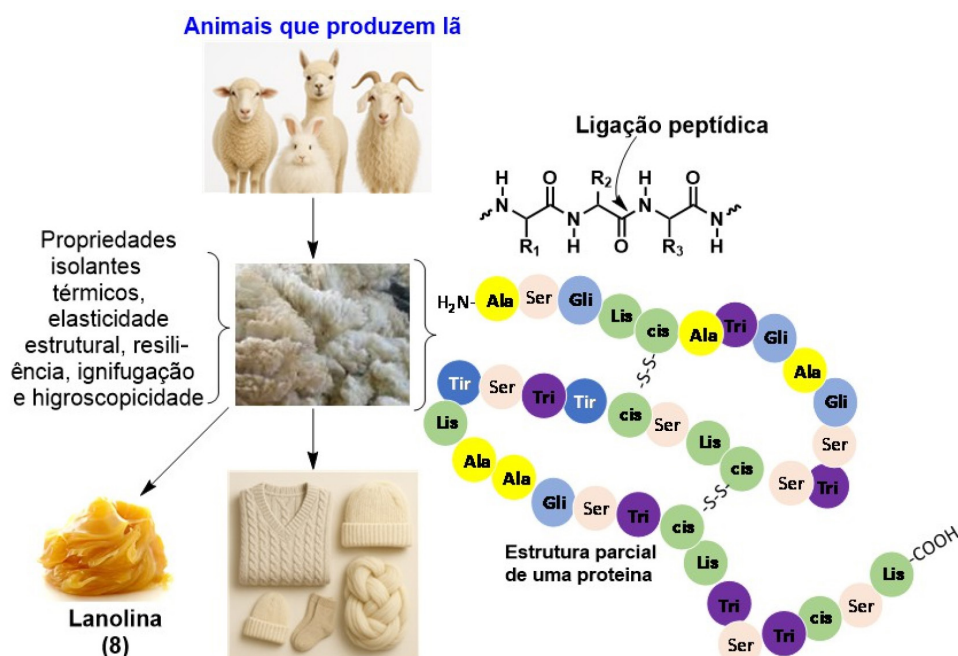


Figura 10. Fontes e produtos da lã e estrutura parcial de uma proteína

cutâneas, antimicrobianos, produtos para administrar outros medicamentos transdérmicos e fitas adesivas cirúrgicas.

A lanolina contém ésteres graxos (14-24%), álcoois livres (6-20%), esteróis e ésteres de álcool triterpeno, como colesterol, (45-65%), além de alguns ácidos graxos hidroxilados,^{68,69} tendo alto índice de saponificação (entre 100 a 110) e o índice de iodo de 15 a 30, indicando baixa insaturação e que não se rançificam durante o armazenamento.⁷⁰ As cadeias de ácidos graxos têm de 14 a 35 átomos de carbono, muitos deles com cadeias ramificadas. Um dos componentes é o estearato de colesterol (9), um produto da esterificação do colesterol (10) com o ácido esteárico (11), e o 7-dehidrocolesterol (12) (Figura 11).

Quando ao seu uso em cosméticos, a lanolina é empregada em uma ampla gama de produtos, tais como hidratantes, batons, brilhos labiais, sabonetes, xampus, amaciantes, protetores solares, lubrificantes e condicionadores de cabelo. De modo geral, também pode ser usada na produção de graxas para calçados, produtos para tratamento de fibras, lustra-móveis, papel, tintas de impressão e acabamentos têxteis. Embora seja considerada uma substância de baixa alergenicidade, é importante mencionar que reações alérgicas podem ocorrer. Alguns estudos sugerem que essas reações podem estar associadas à presença de resíduos de pesticidas, como os piretroides, utilizados na criação de ovelhas para o controle de ectoparasitas.^{71,72}

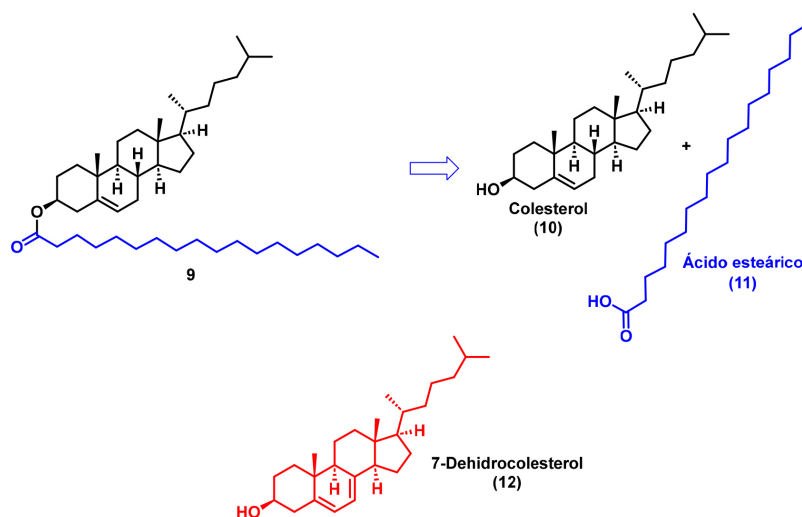


Figura 11. Alguns componentes da lanolina

Segundo a empresa *Grand View Research* especializada em pesquisa de mercado, relata que o mercado da lanolina está projetado para atingir 436,01 milhões de dólares até 2033, com um CAGR de 4,3% de 2025 a 2033 e destaca que esse crescimento está sendo impulsionado pela crescente popularidade de produtos naturais e orgânicos renováveis.⁷³

5.2. Fibras de seda

A seda é uma das fibras proteicas mais antigas conhecidas pela humanidade, com uma história que remonta a mais de 5.000 anos na China antiga. Com essa fibra se produz os tecidos mais luxuosos e, portanto, mais caros. A seda é uma fibra têxtil biodegradável produzida pelo bicho-da-seda (*Bombyx mori*) e a sua produção é limitada, artesanal e extremamente delicada.⁷⁴ A produção de seda é intensiva tanto em tempo quanto em mão de obra. Estima-se que cerca de 5.000 casulos sejam necessários para produzir 1 kg de seda bruta e o rendimento de fibra de um único casulo de seda é de 600 a 1500 m. As proteínas da seda estão presentes e são secretadas pelas glândulas do bicho-da-seda e de outros artrópodes, como aranhas, escorpiões, ácaros e abelhas, transformando-se em fibras durante sua metamorfose da fase larval para fase adulta, no caso dos insetos, ou para a confecção de teias, no caso das aranhas.⁷⁵

O tecido derivado da seda sempre foi um muito apreciado pelo Ocidente e chegou a nomear uma rota comercial no século II a.C., a Rota da Seda, conectando o Oriente ao Ocidente por terra e mar, rota que desempenhou um papel fundamental na troca de bens, culturas, tecnologias e ideias entre civilizações por mais de mil anos. É importante destacar que a Rota da Seda não era uma única estrada, mas sim um conjunto de caminhos interconectados. Mesmo atualmente a ideia de uma Rota da Seda continua no imaginário do comércio de bens, pois a China anunciou

recentemente uma nova iniciativa que visa estabelecer novas conexões entre a Europa e a Ásia.⁷⁶

O ciclo da produção da seda começa com a criação dos bichos-da-seda, que se alimentam exclusivamente de folhas de amoreira. Após a fase de crescimento, as larvas tecem casulos usando um único fio contínuo que pode medir até 1.200 metros de comprimento. A extração da seda envolve o desbobinamento do casulo, geralmente com o uso de água quente para amolecer a sericina, permitindo a retirada do fio sem rompê-lo (Figura 12). As principais propriedades da seda são: brilho, leveza, isolamento térmico e insolubilidade em água.



Figura 12. Ciclo de produção da seda

A seda possui massa molecular entre 200-350 kDa com domínios hidrofóbicos interrompidos por pequenos grupos hidrofílicos.⁷⁷ A análise química mostra que a seda é composta majoritariamente por duas proteínas: fibroína (70-80%), que forma o núcleo estrutural da fibra e a sericina (20-30%), que atua como uma espécie de cápsula que mantém as fibras juntas no casulo, como uma cola de revestimento que protege a fibroína.⁷⁸

A fibroína é rica em aminoácidos pequenos e apolares, como glicina (~45–46%), alanina (~25–30%) e serina (~12%), tendo uma estrutura primária $-(\text{Gly-Ser-Gly-Ala-Gly-Ala})_n-$.⁷⁸ Essa repetição facilita o alinhamento ordenado das cadeias laterais e a formação de regiões cristalinas (ordenadas) e amorfas (desordenadas). A fibroína forma principalmente folhas β antiparalelas onde as cadeias polipeptídicas se alinham lado a lado e são estabilizadas por ligações de hidrogênio entre os grupos $-\text{NH}$ e $-\text{CO}$ das cadeias adjacentes (Figura 13). As regiões cristalinas são ordenadas e ricas em folha do tipo β que dão resistência mecânica e as regiões amorfas que conferem flexibilidade à fibra. A proteína sericina é a camada externa da fibra e mais globular, amorfa e mais hidrofílica, tendo uma estrutura menos ordenada. É rica em resíduos dos aminoácidos serina (30-35%), ácido aspártico (10-15%), glicina (5-10%), treonina (5-8%), tirosina (3-6%), dentre outros minoritários (Figura 13). Essa proteína é parcialmente solúvel, especialmente em água quente, devido aos ácidos aminados serina, treonina e tirosina que possuem grupos hidroxila (OH), favorecendo ligações de hidrogênio com água.⁷⁸

Além do uso como fibra para confecção de tecidos e roupas a seda integral pode ser usada na regeneração de tecidos vivos, filmes, esponjas, hidrogéis, curativos para feridas, tecidos ósseos e cartilagenosos, sendo um exemplo de como a sequência de aminoácidos e a organização tridimensional determinam propriedades macroscópicas. A fibroína isolada pode ser usada na engenharia de tecidos, na fabricação de fios cirúrgicos, no reparo de tecidos, em biomateriais eletrônicos biodegradáveis, e na recuperação

de tecidos como pele (epiderme e derme), cartilagem e osso, tecidos nervosos (nervos periféricos), tecidos cardiovasculares e outros mais.⁷⁹ O tamanho do mercado da proteína fibroína obtida da fibra da seda foi de 1,2 bilhão de dólares em 2024 e deve atingir os 2,5 bilhões de dólares até 2033, registrando um CAGR de 9,1% de 2026 a 2033.⁸⁰

A proteína sericina isolada, por sua vez, tem sido muito usada como ingrediente para cosméticos biodegradáveis, devido às suas propriedades hidratantes, antioxidantes e bioativas, além de ser um subproduto abundante na indústria da seda, o que a torna um ingrediente sustentável e valorizado.⁸¹ Segundo a empresa de consultoria *Fact.MR* o mercado global da sericina foi estimado em 361,5 milhões de dólares em 2025 e um CAGR de 5,8%, devendo atingir 638,9 milhões até 2035 de dólares.⁸²

6. Considerações Finais

Ciência e Desenvolvimento Sustentável continuam a estender seu uso em têxteis e outras indústrias. Com base nas informações apresentadas ao longo do artigo, podemos concluir que os tecidos naturais desempenham um papel fundamental na promoção da sustentabilidade na indústria têxtil. Sua origem renovável, biodegradabilidade e menor impacto ambiental em comparação aos tecidos sintéticos os tornam opções valiosas para redução da poluição e conservação dos recursos naturais. A Química é essencial para a compreensão e otimização das propriedades dessas fibras, bem como nos processos de modificação, tingimento e acabamento, contribuindo para o desenvolvimento de

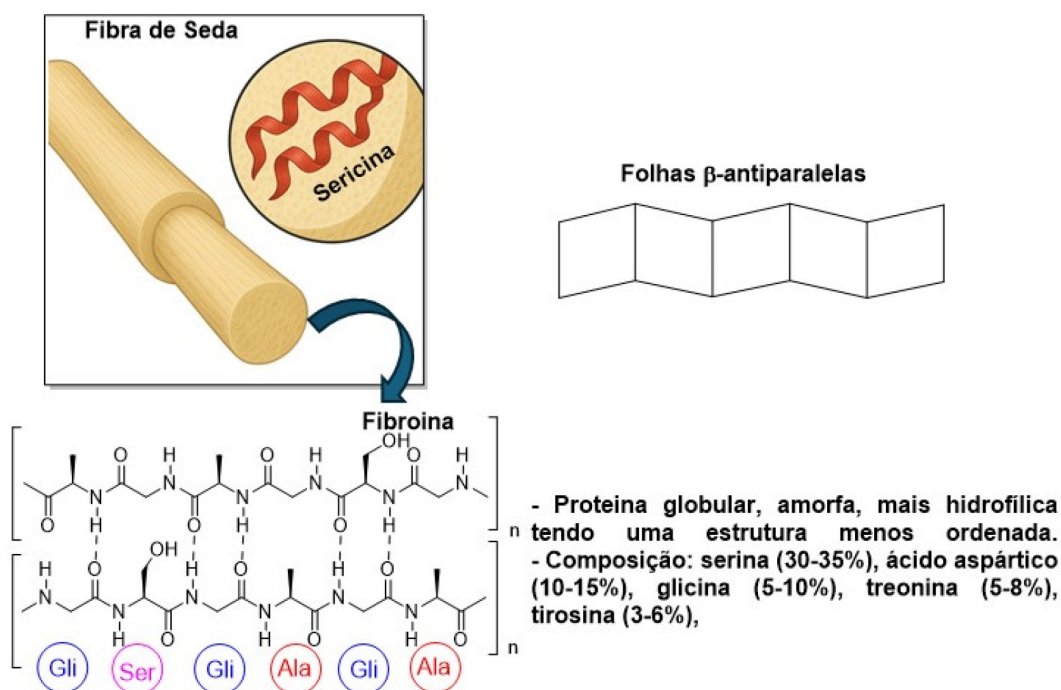


Figura 13. Detalhes sobre a fibra de seda

tecidos mais sustentáveis e de alta qualidade. Embora enfrentem desafios relacionados à produção e condições de cultivo, o aumento do interesse por fibras biodegradáveis indica uma tendência futura de valorização de materiais que conciliam funcionalidade, estética e respeito ao meio ambiente. Portanto, a adoção de práticas que favoreçam a produção responsável e o consumo consciente é imprescindível para o avanço de uma moda mais sustentável e ambientalmente amigável.

Agradecimentos

Agradecemos as bolsas concedidas pela Faperj sob o número E-26/010.101106/2018, Faperj Pensa-Rio E-26/010/00168/2015, FAPERJ-CNE E-26/203.954/2024 – BOLSA, CNPq bolsa 1A 301873/2019-4. CAPES (código de financiamento 001).

Referências Bibliográficas

- Forezi, L. da S. M.; da Silva, F. de C.; Ferreira, V. F.; *Aqui tem Química*, 1a. ed., Interciência: Rio de Janeiro, 2023.
- Ferreira, V. F.; da Silva, F. de C.; Forezi, L. da S. M.; *Aqui tem Química*, Vol. 2 (E-book), e-Paper: Rio de Janeiro, 2024.
- Luo, Y.; Song, K.; Ding, X.; Wu, X.; Environmental sustainability of textiles and apparel: A review of evaluation methods. *Environmental Impact Assessment Review* **2021**, 86, 106497. [Crossref]
- Cotton Monk. Disponível em: <<https://www.cottonmonk.com/blog/sustainable-textiles-the-future-of-eco-friendly-fabric-production/>>. Acesso em: 14 junho 2025.
- Ananjiwala, R.; Hunter, S.; Kozlowski, R.; Zaikov, G.; *Textiles for Sustainable Development*, Nova Science Publishers Inc.: New York, 2007.
- Mordor Intelligende. Disponível em: <[https://www.marketresearchfuture.com/reports/sustainable-fabrics-market-7435?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20269362920&hsa_grp=148912616334&hsa_ad=661977011274&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2314086032131&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1](https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-textile-industry---growth-trends-and-forecast-2019--2024?network=g&source_campaign=&utm_source=google&utm_medium=cpc&matchtype=p&device=c&gad_source=1&gad_campaignid=21370998158&gbraid=0A AAAADm-AlwjN4oV7l93qqaKuXsIAFpcl&gclid=Cj0KCQj wuvrBBhDcARIsAKRrkjgAD1lIn2yos2iaFh8iO2jYtjJ8FW Z5fH5iR6Z QgcZs4nSg-dBw8aAIKWEALw wcB>.>. Acesso em: 14 junho 2025.
Market Research Future. Disponível em: <. Acesso em: 14 junho 2025.
- Naqvi, S. L. H.; Nadeem, M.; Ayub, F.; Yasar, A.; Naqvi, S. H. Z.; Tanveer, R.; Em *Pollution from Textile Industry. SDGs and Textiles Dye*; Singh, P., eds.; Springer: Singapore, 2024, cap. 19.
- Mair, S.; Druckman, A.; Jackson, T.; Global inequities and emissions in Western European textiles and clothing consumption. *Journal of Cleaner Production* **2016**, 132, 57. [Crossref]
- The Guardian. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/world/2025/jun/26/chile-fast-fashion-waste-atacama-desert>>. Acesso em: 14 junho 2025.
- BBC News Brasil. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-60144656#:~:text=Como%20funciona%20o%20mercado%20de,seus%20produtos%20isentos%20de%20impostos>>. Acesso em: 14 junho 2025.
- Mondanaro, A.; Melchionna, M.; Di Febbraro, M.; Castiglione, S.; Holden, P. B.; Edwards, N. R.; Carotenuto, F.; Maiorano, L.; Modafferi, M.; Serio, C.; Diniz-Filho, J. A. F.; Rangel T., Rook L., O'Higgins, P.; Spikins, P.; Profico, A.; Raia, P.; Nature, culture and human occupation of Planet Earth. *Authorea* **2020**, 1. [Crossref]
- DDX Textil. Disponível em: <<https://www.ddxtextil.com.br/a-historia-dos-tecidos-da-idade-antiga-ate-os-dias-de-hoje>>. Acesso em: 14 junho 2025.
- Oliveira, A.; A História do vestuário: os costumes de cada época. Disponível em: <<https://www.cpt.com.br/cursos-confeccao-roupas/artigos/a-historia-do-vestuario-os-costumes-de-cada-epoca>>. Acesso em: 14 junho 2025.
- Gomes, A. V. S.; Costa, N. R. V.; Mohallem, N. D. S.; Os Tecidos e a Nanotecnologia. *Química Nova na Escola* **2016**, 38, 288. [Crossref]
- Kraetzig, E. R. S.; Ávila, L. V.; Beuron, T. A.; Garlet, V.; Climate Change and the Textile Sector: A Systematic Literature Review. *Revista GESTO: Revista de Gestão Estratégica de Organizações* **2024**, 12, 45. [Crossref]
- Longhi, T. C.; Santos, F. A. N. V.; A critical analysis of working conditions in the textile industry since the industrialization of the sector to the present day. *Human Factors in Design* **2016**, 5, 73. [Crossref]
- Fantoni, R. F.; Como a poliamida substituiu a seda: uma história da descoberta da poliamida 66. *Polímeros* **2012**, 22, 1. [Crossref]
- Kozlowski, R. M.; Mackiewicz-Talarczyk, M.; Barriga-Bedoya, J.; *ACS Symposium Series: American Chemical Society*: Washington, 2010.
- Klein, J. A.; Petrere Jr., M.; Butturi-Gomes, D.; Barrella, W.; Textile sustainability: A Brazilian Etiquette Issue. *Environmental Science & Policy* **2020**, 109, 125. [Crossref]
- Duarte, L. O.; Kohan, L.; Pinheiro, L.; Fonseca Filho, H.; Barúque-Ramos, J.; Textile natural fibers production regarding the agroforestry approach. *Springer Nature Applied Sciences* **2019**, 1, 914. [Crossref]
- Kicińska-Jakubowska, A.; Bogacz, E.; Zimmiewska, M.; Review of Natural Fibers. Part I-Vegetable Fibers. *Journal of Natural Fibers* **2012**, 9, 150. [Crossref]

23. Dhir, Y. J.; Em Natural Fiber; Jeon, H.-Y. eds.; IntechOpen: London, 2022, cap. 1.
24. Klemm, D.; Heublein, B.; Fink, H.-P.; Bohn, A.; Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition* **2005**, *44*, 3358. [Crossref]
25. Keijsers, E. R. P.; Yilmaz, G.; van Dam, J. E. G.; The cellulose resource matrix. *Carbohydrate Polymers* **2013**, *93*, 9. [Crossref]
26. Brown, R. M.; Cellulose structure and biosynthesis. *Pure and Applied Chemistry* **1999**, *71*, 767. [Crossref]
27. Ockendon, D. J.; Taxonomy of the *Linum perenne* group in Europe. *Watsonia* **1971**, *8*, 205. [Link]
28. Warden, A. J.; *The Linen Trade, Ancient and Modern*, 3a. ed., Frank Cass and Company Limited: Londres, 1967.
29. Kvavadze, E.; Bar-Yosef, O.; Belfer-Cohen, A.; Boaretto, E.; Jakeli, N.; Matskevich, Z.; Meshveliani, T.; 30,000-Year-Old Wild Flax Fibers-Testimony for Fabricating Prehistoric Linen. *Science* **2009**, *325*, 1359. [Crossref]
30. a) Hamilton, I. T.; Linen. *Textiles* **1986**, *15*, 30. b) Akin, D. E.; Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax. *International Scholarly Research Notices* **2013**, *1*, 186534. [Crossref]
31. Saliba, E. O. S.; Rodriguez, N. M.; Morais, S. A. L.; Piló-Veloso, D.; Ligninas - Métodos de Obtenção e Caracterização Química. *Ciência Rural* **2001**, *31*, 917. [Crossref]
32. Lee, J. A.; Fang, D. D.; Em *Cotton*, 2a. ed.; Fang, D. D.; Percy, R. G., eds.; American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America: Madison, 2015, cap. 1.
33. EMPRABA. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/4054001/algodoeiro>>. Acesso em: 20 junho 2025.
34. Ismail, S.; Azha, S. F.; Cotton Cloth: Diversified Applications beyond Fashion and Wearable Cloth. *Current Trends in Fashion Technology & Textile Engineering* **2018**, *2*, 555587. [Crossref]
35. Renub Research. Disponível em: <https://www.renub.com/global-cotton-market-p.php?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 20 junho 2025.
36. Abidi, N.; Cabrales, L.; Haigler, C. H.; Changes in the cell wall and cellulose content of developing cotton fibers investigated by FTIR spectroscopy. *Carbohydrate Polymers* **2014**, *100*, 9. [Crossref]
37. Liu, Y.; Em *Cotton Fiber: Physics, Chemistry and Biology*; Fang, D. (eds); Springer: Cham, 2018, cap 4.
38. Kadimi, A.; Benhamou, K.; Habibi, Y.; Ounaies, Z.; Kaddami, H.; Em *Multifunctional Polymeric Nanocomposites Based on Cellulosic Reinforcements*, 1a. ed.; Puglia, D.; Fortunati, E.; Kenny, J. M., eds; William Andrew Publishing: Oxford, 2016, cap. 11.
39. Bai, F.; Scheffler, J.; Genetic and Molecular Regulation of Cotton Fiber Initiation and Elongation. *Agronomy* **2024**, *14*, 1208. [Crossref]
40. Saremi, R.; Rai, S.; Sharma, S.; Em *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science*; Altalhi, T.; Inamuddin, eds.; Elsevier: Amsterdam, 2022, cap. 21.
41. Sheikh, J.; Bramhecha, I.; Em *The Textile Institute Book Series, The Impact and Prospects of Green Chemistry for Textile Technology*; Shahid-ul-Islam; Butola, B. S., eds.; Woodhead Publishing: Duxford, 2019, cap. 6.
42. Aziz, T.; Farid, A.; Haq, F.; Kiran, M.; Ullah, A.; Zhang, K.; Li, C.; Ghazanfar, S.; Sun, H.; Ullah, R.; Ali, A.; Muzammal, M.; Shah, M.; Akhtar, N.; Selim, S.; Hagagy, N.; Samy, M.; Al Jaouni, S. K.; A Review on the Modification of Cellulose and Its Applications. *Polymers* **2022**, *14*, 3206. [Crossref]
43. Mohammadipour-Nodoushan, R.; Shekarriz, S.; Shariatnia, Z.; Heydari, A.; Montazer, M.; Improved cotton fabrics properties using zinc oxide-based nanomaterials: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* **2023**, *242*, 124916. [Crossref]
44. Paul, R.; Bautista, L.; De la Varga, M.; Botet, J. M.; Casals, E.; Puentes, V.; Marsal, F.; Nano-cotton Fabrics with High Ultraviolet Protection. *Textile Research Journal* **2009**, *80*, 454. [Crossref]
45. Rashid, M. M.; Simončič, B.; Tomšič, B.; Recent advances in TiO₂-functionalized textile surfaces. *Surfaces and Interfaces* **2021**, *22*, 100890. [Crossref]
46. Granados, A.; Pleixats, R.; Vallribera, A.; Recent Advances on Antimicrobial and Anti-Inflammatory Cotton Fabrics Containing Nanostructures. *Molecules* **2021**, *26*, 3008. [Crossref]
47. Esteve-Turrillas, F. A.; de la Guardia, M.; Environmental impact of Recover cotton in textile industry. *Resources, Conservation and Recycling* **2017**, *116*, 107. [Crossref]
48. Niinimäki, K.; Peters, G.; Dahlbo, H.; Perry, P.; Rissanen, T.; Gwilt, A.; The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth & Environment* **2020**, *1*, 189. [Crossref]
49. Roy Choudhury, A. K.; Em *Textile Science and Clothing Technology*; Muthu, S. eds.; Roadmap to Sustainable Textiles and Clothing; Springer: Singapore, 2014, cap. 1.
50. Muthu, S. S.; *Textile Science and Clothing Technology*, Springer Nature: New York, 2014.
51. Promhuad, K.; Srisa, A.; San, H.; Laorenza, Y.; Wongphan, P.; Sodjai, J.; Tansin, K.; Phromphen, P.; Chartvivatpornchai, N.; Ngoenchai, P.; Harnkarnsujarit, N.; Applications of Hemp Polymers and Extracts in Food, Textile and Packaging: A Review. *Polymers* **2022**, *14*, 4274. [Crossref]
52. Li, H.-L.; An archaeological and historical account of cannabis in China. *Economic Botany* **1973**, *28*, 437. [Crossref]
53. Hayase, S.; Manila Hemp in World, Regional, National and Local History. *Journal of Asia-Pacific Studies* **2018**, *3*, 171. [Crossref]
54. Pal, L.; Lucia, L. A.; Renaissance of industrial hemp: A miracle crop for a multitude of products. *BioResources* **2019**, *14*, 2460. [Link]
55. Kamah. Disponível em: <<https://kamah.com.br/canhampo-panorama-e-potencial-no-brasil/>>. Acesso em: 25 junho 2025.
56. Adesina, I.; Bhowmik, A.; Sharma, H.; Shahbazi, A.; A Review

- on the Current State of Knowledge of Growing Conditions, Agronomic Soil Health Practices and Utilities of Hemp in the United States. *Agriculture* **2020**, 10, 129. [Crossref]
57. Market Research Future. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/hemp-derivatives-market-8424/?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20266715755&hsa_grp=151736942524&hsa_ad=661538375401&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2204778215196&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1>. Acesso em: 25 junho 2025.
 58. Odieka, A. E.; Obuzor, G. U.; Oyediji, O. O.; Gondwe, M.; Hosu, Y. S.; Oyediji, A. O.; The Medicinal Natural Products of *Cannabis sativa* Linn.: A Review. *Molecules* **2022**, 27, 1689. [Crossref]
 59. Zhang, H.; Zhong, Z.; Feng, L.; Advances in the Performance and Application of Hemp Fiber. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology* **2016**, 17, 18.1. [Crossref]
 60. Lindley, H.; Em *Chemistry of Natural Protein Fibers*; Asquith, R.S., eds.; Springer: Boston, 1977, cap. 4.
 61. *Chemistry of Natural Protein Fibers*. Asquith, R. S., eds.; Plenum Press: New York, 1977.
 62. Fact.MR. Disponível em: <<https://www.factmr.com/report/wool-market>>. Acesso em: 26 junho 2025.
 63. Ghermezgoli, Z. M.; Moezzi, M.; Yekrang, J.; Rafat, S. A.; Soltani, P.; Barez, F.; Sound absorption and thermal insulation characteristics of fabrics made of pure and crossbred sheep waste wool. *Journal of Building Engineering* **2021**, 35, 102060. [Crossref]
 64. Cardamone, J. M.; Nunez, A.; Garcia, R. A.; Aldema-Ramos, M.; Characterizing Wool Keratin. *Research Letters in Materials Science* **2009**, 1, 147175. [Crossref]
 65. Rippon, J. A.; Em *The Coloration of Wool and other Keratin Fibres*; Editores Lewis, D. M.; Rippon, J. A., eds.; Wiley: New York, cap. 1.
 66. Sengupta, A.; Behera, J.; Comprehensive view on chemistry, manufacturing & applications of lanolin extracted from wool pretreatment. *American Journal of Engineering Research* **2014**, 3, 33. [Link]
 67. Forezi, L. da S. M.; Hüther, C. M.; Ferreira, P. G.; Portella, D. P.; Gonzaga, D. T. G.; da Silva, F. de C.; Ferreira, V. F.; Aqui tem Química: Parte V. Ceras Naturais. *Revista Virtual de Química* **2022**, 14, 877. [Crossref]
 68. Krendlinger, E.; Waxes. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* **2025**. [Crossref]
 69. Truter, E. V.; The constitution of wool wax. *Quarterly Reviews, Chemical Society* **1951**, 5, 390. [Crossref]
 70. Schlossman, M. L.; McCarthy, J. P.; Lanolin and its derivatives. *Journal of the American Oil Chemists Society* **1978**, 55, 447. [Crossref]
 71. Jones, F. W.; Multiresidue Analysis of Pesticides in Wool Wax and Lanolin Using Gel Permeation and Gas Chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* **1996**, 44, 10, 3197. [Crossref]
 72. Kligman, A. M.; The myth of lanolin allergy. *Contact Dermatitis* **1998**, 39, 103. [Crossref]
 73. Grand View Research. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/filters?search=Lanolin%20Market>>. Acesso em: 09 janeiro 2026.
 74. Babu, K. M.; Em *The Textile Institute Book Series*, 2a. ed.; Babu, K. M., eds.; Woodhead Publishing: Duxford, 2019, cap. 1.
 75. Jin, H.-J.; Kaplan, D. L.; Mechanism of silk processing in insects and spiders. *Nature* **2003**, 424, 1057. [Crossref]
 76. Li, Y.; Schmerer, H.-J.; Trade and the New Silk Road: opportunities, challenges, and solutions. *Journal of Chinese Economic and Business Studies* **2017**, 15, 205. [Crossref]
 77. Ayoub, N. A.; Garb, J. E.; Tinghitella, R. M.; Collin, M. A.; Hayashi, C. Y.; Blueprint for a high-performance biomaterial: Full-length spider dragline silk genes, *PLoS One* **2007**, 2, e514. [Crossref]
 78. Long, D.; Yang, Z.; Zhang, X.; Kundu, S. C.; Du, Y.; Zhang, Z.; Yang, C.; Dai, F.; Advances in Silkworm Silk Proteins: From Textile to Biomedical Innovations. *Journal of Resource Insects* **2025**, 100005. [Crossref]
 79. Lima, I. R.; Paresque, M. C. C.; Pereira, L. F. L.; Fialho, B. O.; Silva, H. S.; Simão, R. A.; Castro, J. A.; Fonseca, G. S.; Em *Engenharia de Materiais e Metalúrgica: Tudo à sua Volta*; Atena Editora: Ponta Grossa, 2021, cap. 16.
 80. Verified Market Reports. Disponível em: <<https://www.verifiedmarketreports.com/product/silk-fibroin-sf-market/>>. Acesso em: 5 julho 2025.
 81. Altman, G. H.; Diaz, F.; Jakuba, C.; Calabro, T.; Horan, R. L.; Chen, J.; Lu, H.; Richmond, J.; Kaplan, D. L.; Silk-based biomaterials. *Biomaterials* **2003**, 24, 401. [Crossref]
 82. Fact.MR. Disponível em: <<https://www.factmr.com/report/3248/sericin-market>>. Acesso em: 5 julho 2025.