



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

JOSÉ EDUARDO DA SILVA PEREIRA

**PRODUÇÃO DE BIOPOLÍMERO A PARTIR DA CERA DE CARNAÚBA (*Copernicia
prunifera*) COM FIBRAS DAS FOLHAS COMO AGENTE ESTRUTURAL**

PAU DOS FERROS/RN

2026

JOSÉ EDUARDO DA SILVA PEREIRA

PRODUÇÃO DE BIOPOLÍMERO A PARTIR DA CERA DE CARNAÚBA (*Copernicia prunifera*) COM FIBRAS DAS FOLHAS COMO AGENTE ESTRUTURAL

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Kytéria Sabina Lopes de Figueredo, Profa. Dra.

PAU DOS FERROS/RN

2026

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P436p Pereira, José Eduardo da Silva.
 Produção de biopolímero a partir da cera de
 carnaúba (*Copernicia prunifera*) com fibras das
 folhas como agente estrutural / José Eduardo da
 Silva Pereira. - 2026.
 67 f. : il.

 Orientador: Kytéria Sabina Lopes de Figueredo.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
 Tecnologia, 2026.

 1. Biopolímeros. 2. Cera de carnaúba. 3. Fibras
 vegetais. 4. Sustentabilidade. 5. Biomassa. I.
 Figueredo, Kytéria Sabina Lopes de, orient. II.
 Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

 Biblioteca Campus Pau dos Ferros
 Bibliotecária: Erlanda Maria Lopes da Silva
 CRB: 15/966

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOSÉ EDUARDO DA SILVA PEREIRA

**PRODUÇÃO DE BIOPOLÍMERO A PARTIR DA CERA DE CARNAÚBA
(COPERNICIA PRUNIFERA) COM FIBRAS DAS FOLHAS COMO AGENTE
ESTRUTURAL**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, como requisito para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 18 /06 /2026.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **KYTERIA SABINA LOPES DE FIGUEREDO**
Data: 29/06/2026 22:03:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Kytéria Sabina Lopes de Figueredo, Profa. Dra. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **SANDERLIR SILVA DIAS**
Data: 30/06/2026 11:30:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Sanderlir Silva Dias, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **ALINE MARA MAIA BESSA**
Data: 01/07/2026 12:06:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Aline Mara Maia Bessa, Profa. Dra. (UFERSA)
Membro Examinador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha avó, Maria Luzia da Conceição Pereira, meu maior exemplo de força e resiliência. Também dedico ao meu amigo e irmão de coração, Pedro Henrique Bezerra Valentim, cuja lembrança permanece viva em minha trajetória (*In memoriam*).

Dedico esta conquista à minha família, amigos, professores e funcionários, que contribuíram para a realização deste sonho (*presentes*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por todas as bênçãos recebidas, e à Nossa Senhora Aparecida e São Bento, pela força e proteção constantes.

À minha família, minha base e sustentação: ao meu pai, José do Egito Pereira, por cada manhã em que se levantou para preparar o café, comprar o pão e seguir para o trabalho em busca do sustento de nossa casa.

À minha mãe, Maria Rita da Silva Pereira, fonte inesgotável de cuidado, que sempre pensava no que eu iria comer ao chegar da universidade e que tantas vezes me trouxe água ou café enquanto eu estudava.

Ao meu irmão, Jeferson Egídio da Silva Pereira, que, apesar das diferenças, completa em mim o que me falta: eu sou a paciência que lhe falta, e ele é o estresse que me equilibra. Obrigado por manter o quarto organizado para que eu pudesse estudar.

À minha namorada, Francisca Emilly Souza Lins, por ser o ponto de equilíbrio entre a turbulência da vida acadêmica e a certeza de finais de semana felizes.

Agradeço à minha avó, Maria Tecla, por sempre lembrar de rezar por mim, mesmo à distância.

Aos meus avôs, Francisco de Assis e Francisco Canindé, que sempre foram exemplos de simplicidade e humildade.

Agradeço à minha tia Luzia Neta, que sempre me incentivou e colocou muitas coisas para frente. Obrigado pelos conselhos, pelos lanches, pelos pix's e por estar presente em tantos momentos. Como costumo dizer: "A culpa é sua".

Expresso minha gratidão a todos os meus amigos; não citarei nomes para não correr o risco de esquecer alguém, mas deixo aqui meu sincero obrigado a cada um.

Agradeço especialmente a Danubia Aniele, que ao longo deste ciclo, além de companhia, sempre esteve disposta a esclarecer minhas dúvidas quando eu dizia não entender nada. Também agradeço à Paulina, que completou nosso trio, os crânios, tornando esta jornada mais leve. Agradeço também à Érica, que me ajudou bastante nas formatações.

À orientadora Kytéria Sabina Lopes de Figueiredo, que aceitou o desafio e iluminou este percurso com contribuições essenciais, deixo minha sincera gratidão. Agradeço também a todos os professores que fizeram parte do meu desenvolvimento acadêmico, transmitindo conhecimento.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta, deixo aqui meu sincero obrigado.

RESUMO

O uso e o descarte incorreto de plásticos derivados de petróleo causam sérios danos ao meio ambiente, já que eles demoram muito para se decompor e consequentemente poluem os ecossistemas. Por isso, é importante buscar opções mais sustentáveis e biodegradáveis. Foi analisada a produção de biopolímero a partir da cera de carnaúba (*Copernicia prunifera*) com fibras das folhas como agente estrutural, utilizando-se a metodologia experimental e aplicada com abordagem qualitativa, que compreendeu a extração de fibras de carnaúba e amido de batata, a síntese de filmes biopoliméricos por meio de emulsão e gelatinização, e a caracterização dos materiais através de ensaios de aspecto visual, combustão e permeabilidade em água. Os resultados obtidos indicam que as formulações BCFAN35 e BCFAC35 (compostas por 35% de amido e 5% de fibra) apresentaram os melhores índices de estabilidade, integridade estrutural e homogeneidade, evidenciando que a cera de carnaúba atua como um agente hidrofóbico essencial para otimizar a capacidade de barreira do material contra a umidade. Dessa forma, conclui-se que a formulação BCFAN35, produzida com amido natural, é a mais viável para aplicações práticas por assemelhar-se a filmes poliméricos de origem celulósica, reforçando a importância de promover a inovação tecnológica sustentável e o aproveitamento integral da biomassa regional do Nordeste brasileiro para reduzir a dependência de polímeros sintéticos de matriz fóssil.

Palavras-chave: biopolímeros; cera de carnaúba; fibras vegetais; sustentabilidade; biomassa.

ABSTRACT

The use and improper disposal of petroleum-derived plastics cause serious damage to the environment, as they take a long time to decompose and consequently pollute ecosystems. Therefore, it is important to seek more sustainable and biodegradable options. The production of biopolymer from carnauba wax (*Copernicia prunifera*) with leaf fibers as a structural agent was demonstrated using an experimental and applied methodology with a qualitative approach. This methodology included the extraction of carnauba fibers and potato starch, a description of biopolymeric films through emulsion and gelatinization, and a characterization of the materials through visual appearance, combustion, and water permeability tests. The results show that the BCFAN35 and BCFAC35 formulations (composed of 35% starch and 5% fiber) presented the best indices of stability, structural integrity, and homogeneity, demonstrating that carnauba wax acts as an essential hydrophobic agent to improve the material's barrier capacity against moisture. Thus, it can be concluded that the BCFAN35 formulation, produced with natural starch, is the most viable for practical applications to resemble polymeric films of cellulosic origin, reinforcing the importance of promoting sustainable technological innovation and the full utilization of regional biomass from Northeast Brazil to reduce dependence on synthetic polymers of fossil origin.

Keywords: biopolymers; carnauba wax; vegetable fibers; sustainability; biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de uma reação de polimerização.....	17
Figura 2 - Etapas da polimerização em cadeia (iniciação, propagação e terminação)	19
Figura 3 - Etapa de Iniciação da Reação de Polimerização.....	20
Figura 4 - Etapa de propagação da Reação de Polimerização	20
Figura 5 - Terminação por combinação.....	21
Figura 6 - Terminação por desproporcionamento	21
Figura 7 - Reação de policondensação para obtenção do poli(tereftalato de etileno)	22
Figura 8 - Esquema geral dos tipos de biopolímeros e suas subdivisões	24
Figura 9 - Estrutura química da celulose	25
Figura 10 - Estrutura molecular da amilose e da amilopectina	28
Figura 11 - Representação da composição lignocelulósica	32
Figura 12 - Palmeira carnaúba (Copernicia prunifera).....	35
Figura 13 - Pó de olho da carnaúba	36
Figura 14 - Pó de palha da carnaúba.....	37
Figura 15 - Cera de carnaúba Tipo I.....	37
Figura 16 - Cera de carnaúba Tipo III	38
Figura 17 - Cera de carnaúba Tipo IV	38
Figura 18 - Fluxograma do processo produtivo da cera de carnaúba.....	39
Figura 19 - Cera de carnaúba comercial utilizada	43
Figura 20 - Imagem representativa da Palha de carnaúba seca	44
Figura 21 - Palha de carnaúba picada.....	45
Figura 22 - Processo de moagem da palha de carnaúba picada.....	45
Figura 23 - Comparativo entre a granulometria da palha de carnaúba picada (à esquerda) e moída (à direita).....	46
Figura 24 - Palha de carnaúba moída e peneirada	46
Figura 25 - Batata cortada e descartadas	47
Figura 26 - Material após trituração em liquidificador.....	48
Figura 27 - Amido após o processo de lavagens	48
Figura 28 - Representação esquemática do processo de produção.....	50
Figura 29 - Biopolímero BCFAN35 após 7 dias	52
Figura 30 - Biopolímero BCFAN30 após 7 dias	53
Figura 31 - Biopolímero BCFAN25 após 7 dias	54
Figura 32 - Biopolímero BCFAC35 após 7 dias	55
Figura 33 - Biopolímero BCFAC30 após 7 dias	56
Figura 34 - Biopolímero BCFAC25 após 7 dias	57
Figura 35 - Aplicação de água (BCFAN35).....	59
Figura 36 - Após 5 minutos (BCFAN35)	59
Figura 37 - Aplicação de água (BCFAC35)	60
Figura 38 - Após 5 minutos (BCFAC35)	61
Figura 39 - Comparativo de formulações e resultados frente à literatura.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos bioplásticos	42
Tabela 2 - Formulações dos filmes biopoliméricos.....	49
Tabela 3 - Dados obtidos com a combustão	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABM	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
FDA	Food and Drug Administration
ONU	Organização das Nações Unidas
PCL	Policaprolactona
PHA	Poli-hidroxiálcanoato
PHB	Poli-hidroxibutirato
PLA	Poli(ácido láctico)
s.d.	Sem data
TPS	Amido termoplástico (Thermoplastic Starch)
WPC	Wood Plastic Composite (Compósito madeira-plástico)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Polímeros e métodos de obtenção.....	17
3.1.1 Polimerização	17
3.1.1.1 Polimerização em cadeia ou poliadição.....	18
3.1.1.1.1 Iniciação.....	19
3.1.1.1.2 Propagação	20
3.1.1.1.3 Terminação	21
3.1.1.2 Polimerização em etapas ou policondensação.....	22
3.1.2 Técnicas de polimerização	23
3.2 Biopolímeros	23
3.2.1 Classificação dos biopolímeros	24
3.2.1.1 Biopolímeros de origem natural	25
3.2.1.2 Biopolímeros sintetizados por organismos.....	26
3.2.1.3 Biopolímeros sintetizados a partir de monômeros naturais.....	26
3.2.2 Modificações	26
3.3 Principais biopolímeros.....	27
3.3.1 Amido	27
3.3.2 Poli(ácido láctico) (PLA)	28
3.3.3 Poli-hidroxiálcanoatos (PHAs).....	29
3.4 Ceras naturais como matriz polimérica	30
3.4.1 Propriedades das ceras.....	30
3.4.2 Aplicação das ceras naturais em biopolímeros.....	31
3.5 Fibras naturais.....	31
3.5.1 Fibras vegetais	32
3.5.1.1 Celulose	33
3.5.1.2 Hemiceluloses.....	33
3.5.1.3 Lignina.....	34

3.6 Carnaúba.....	34
3.6.1 Cera de carnaúba	36
3.6.2 Fibras de carnaúba	39
3.7 Sustentabilidade e impacto ambiental dos biopolímeros	41
4 MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 Obtenção da matéria-prima	43
4.1.1 Cera de Carnaúba.....	43
4.1.2 Extração da fibra de Carnaúba	44
4.1.3 Extração do amido de Batata Inglesa	47
4.2 Processo de síntese do biopolímero	49
4.3 Caracterização do biopolímero	51
4.3.1 Cor e Aspecto	51
4.3.2 Combustão	51
4.3.3 Permeabilidade	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 Sínteses de biopolímero à base de amido natural	52
5.2 Sínteses de biopolímero à base de amido comercial	55
5.3 Comportamento dos biopolímeros sob combustão.....	58
5.4 Permeabilidade em água	58
5.5 Análise comparativa com a literatura.....	61
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

As significativas preocupações com os impactos ambientais decorrentes do uso e descarte inadequado de plásticos sintéticos têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis capazes de reduzir a poluição e promover práticas de consumo mais responsáveis (Matheus *et al.*, 2025). Os plásticos constituem a principal classe dos materiais poliméricos e são amplamente utilizados em diversas aplicações devido à sua baixa massa específica, facilidade de conformação e ampla variedade de propriedades mecânicas. Esses materiais podem apresentar desde comportamento rígido e frágil até elevada flexibilidade, sendo produzidos por processos de polimerização e classificados principalmente em termoplásticos e termorrígidos (Callister, 2020).

Segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU, 2023), a produção global de plástico ultrapassa 400 milhões de toneladas por ano, e menos de 10% desse volume é efetivamente reciclado. Como resultado, o acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente cresce continuamente, provocando impactos significativos nos ecossistemas. Uma parcela expressiva desses resíduos alcança ambientes aquáticos, comprometendo a vida marinha e a qualidade da água. Além disso, os microplásticos (fragmentos minúsculos provenientes da degradação do plástico) já foram detectados no ar, na água e nos alimentos, evidenciando a amplitude da contaminação e os riscos à saúde humana e ambiental.

Diante dos impactos ambientais causados pelo acúmulo de resíduos plásticos, intensifica-se a busca por alternativas mais sustentáveis, como os biopolímeros. Segundo a European Bioplastics [s.d.], um material é considerado bioplástico quando é produzido a partir de fontes biológicas, é biodegradável ou reúne ambas as características. Nesse contexto, a carnaúba emerge como uma alternativa promissora, devido a sua composição química favorável e a sua origem renovável de base vegetal. Além de ser abundante em regiões como o Nordeste brasileiro, a carnaúba possui propriedades que podem ser exploradas na produção de materiais biodegradáveis, contribuindo para a redução da dependência de polímeros sintéticos derivados do petróleo (Souza, 2020).

A carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma palmeira nativa do Brasil, amplamente utilizada na economia devido ao aproveitamento integral de suas partes. Sua principal aplicação é a extração do pó cerífero presente nas folhas, utilizado na produção da cera, substância sintetizada naturalmente pela planta para reduzir a perda de água por transpiração (Silva *et al.*, 2025). As ceras naturais, como a da carnaúba, são compostas predominantemente por ésteres de ácidos graxos e álcoois de cadeia longa, além de conterem álcoois livres, ácidos graxos,

hidrocarbonetos e esteróis. Esses compostos apresentam longas cadeias carbônicas e baixa solubilidade em solventes polares, características que influenciam suas propriedades físico-químicas e dificultam reações como hidrólise e saponificação (Forezi *et al.*, 2022).

Segundo Carvalho (2011), as fibras vegetais podem ser classificadas conforme sua origem, sendo agrupadas em fibras provenientes de sementes, caules, folhas, frutos e raízes. Essas fibras naturais são compostas principalmente por celulose, além de apresentarem quantidades significativas de lignina e hemicelulose, o que afeta suas propriedades adesivas.

Dada a versatilidade dos produtos obtidos da carnaúba, observa-se que sua cera apresenta ampla aplicação em diversos setores industriais, enquanto as fibras extraídas de suas folhas despontam como alternativa promissora para o desenvolvimento de materiais sustentáveis. Paralelamente, cresce a preocupação ambiental diante da poluição causada pelos plásticos convencionais, derivados do petróleo, que possuem baixa biodegradabilidade e geram impactos significativos nos ecossistemas e na saúde humana. Nesse contexto, torna-se essencial buscar soluções que conciliem desempenho tecnológico e responsabilidade ambiental.

Embora diversos estudos tenham investigado o uso de amido e fibras vegetais na produção de materiais biodegradáveis, ainda são limitadas as pesquisas que exploram simultaneamente a cera de carnaúba e as fibras de suas folhas como componentes estruturais de biopolímeros. Considerando a ampla disponibilidade dessa biomassa no Nordeste brasileiro e suas propriedades físico-químicas, torna-se relevante avaliar seu potencial para o desenvolvimento de materiais sustentáveis e de menor impacto ambiental.

Diante da necessidade de alternativas sustentáveis aos plásticos convencionais e considerando o potencial econômico e ambiental da carnaúba, este trabalho propõe a produção de biopolímeros utilizando cera de carnaúba, fibras de suas folhas e amido como matéria-prima. A pesquisa busca avaliar o desempenho das formulações obtidas e contribuir para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis capazes de agregar valor à biomassa regional e reduzir a dependência de polímeros de origem fóssil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Produzir um biopolímero à base de cera de carnaúba (*Copernicia prunifera*), amido e fibras das folhas da carnaúba, visando investigar seu potencial como material biodegradável.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter fibras de carnaúba para utilização como agente estrutural nas formulações dos biopolímeros;
- Extrair amido de batata inglesa para aplicação na produção dos biopolímeros;
- Produzir diferentes formulações de biopolímeros utilizando cera de carnaúba, fibras de carnaúba e amido em diferentes proporções;
- Comparar biopolímeros produzidos com amido natural e amido comercial;
- Avaliar as características visuais dos biopolímeros obtidos quanto à cor, homogeneidade e integridade estrutural;
- Analisar o comportamento dos biopolímeros sob combustão;
- Avaliar a permeabilidade dos biopolímeros em contato com água.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

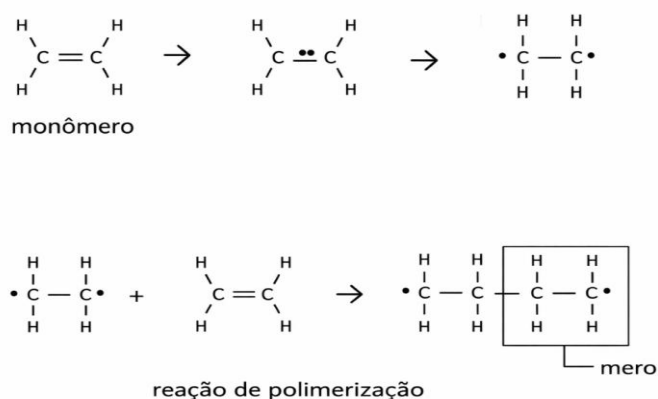
3.1 Polímeros e métodos de obtenção

3.1.1 Polimerização

O desenvolvimento da ciência dos polímeros tem como marco fundamental os estudos do químico alemão Hermann Staudinger que, em 1920, publicou o artigo pioneiro “*Über Polymerisation*”, no qual propôs um modelo estrutural para a borracha e correlacionou a extensão das cadeias moleculares às suas propriedades mecânicas macroscópicas. Embora essa teoria macromolecular tenha enfrentado ceticismo inicial da comunidade acadêmica, sua validação impulsionou os maiores avanços científicos do século XX (Natarelli *et al.*, 2022).

A partir dos fundamentos da ciência dos materiais, a polimerização é definida como a reação química na qual moléculas menores, chamadas monômeros, unem-se para formar essas longas cadeias que, por sua elevada massa molar, são classificadas como macromoléculas unidas por ligações covalentes interatômicas. Tais estruturas são constituídas pela repetição sucessiva de unidades fundamentais denominadas "meros", termo derivado do grego que significa "parte", o que atualmente permite o projeto e a síntese de materiais industriais com propriedades específicas, que apresentam desempenho técnico superior ao dos análogos naturais (Callister, 2020). O processo de polimerização pode ser representado esquematicamente pela união sucessiva de monômeros, resultando na formação de uma cadeia polimérica (Figura 1).

Figura 1- Representação esquemática de uma reação de polimerização



Fonte: Queiroz Júnior (2018).

Embora o termo “polímero” tenha sido introduzido ainda no século XIX por Berzelius para descrever moléculas com grupos atômicos repetidos, foi a partir da validação do modelo macromolecular que a área se expandiu industrialmente. Diante disso, as décadas de 1930 e 1940 apresentaram um crescimento significativo na síntese de novos materiais, como as poliamidas, o polietileno, o neopreno, o poliestireno e o politetrafluoretileno (PTFE) (Natarelli *et al.*, 2022).

Desde o fim da Segunda Guerra Mundial, o advento desses polímeros sintéticos revolucionou o campo dos materiais (Callister, 2020), consolidando o cenário atual, no qual esses compostos viabilizam aplicações modernas e de alta tecnologia em setores como a medicina, a eletrônica, a construção civil e o desenvolvimento de embalagens inteligentes (Natarelli *et al.*, 2022). Segundo Natarelli *et al.* (2022), pode-se definir monômero e polímero como sendo:

Monômero é uma molécula que pode sofrer polimerização, contribuindo assim, com unidades constitucionais à estrutura essencial de uma macromolécula. Mero é a maior unidade constitucional contribuída por uma única molécula de monômero para a estrutura de uma macromolécula (Natarelli *et al.*, 2022 p.54).

Polímero é uma substância composta de macromoléculas, que são moléculas de alta massa molecular relativa, cuja estrutura compreende essencialmente na repetição múltipla de unidades derivadas, real ou conceitualmente, de moléculas de baixa massa molecular relativa (Natarelli *et al.*, 2022 p.53).

3.1.1.1 Polimerização em cadeia ou poliadição

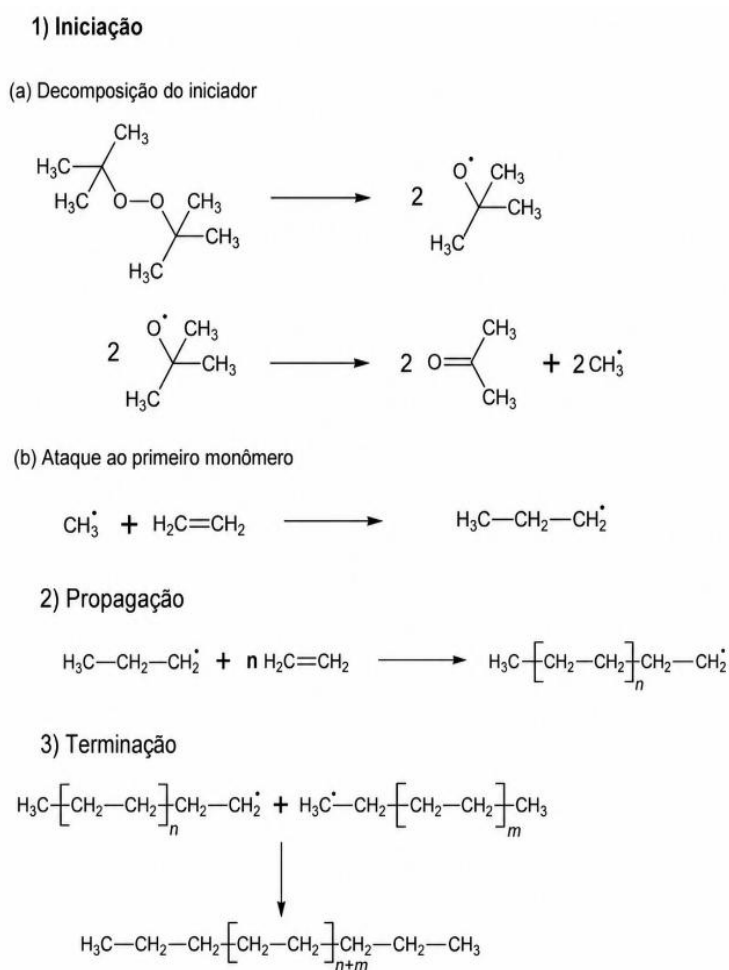
A reação de polimerização em cadeia, também chamada de poliadição, é um processo que ocorre em três etapas diferentes: iniciação, propagação e terminação. Esse tipo de polimerização apresenta um processo de reação na qual os monômeros presentes se unem, um por um, para formar uma macromolécula, ou seja, formam um polímero (Callister, 2020).

É importante destacar que os monômeros precisam de um iniciador, pois apenas o contato entre eles não é suficiente, sendo assim, é preciso usar uma espécie química ativa, onde o ponto de reação pode ser um radical livre, um cátion ou um ânion, dependendo do tipo de polimerização (Queiroz Júnior, 2018).

De acordo com Natarelli *et al.* (2022), apesar de esse tipo de polimerização conter três etapas diferentes, elas acontecem de forma muito rápida, o que permite que uma massa molar elevada seja alcançada em pouco tempo. A sequência dessas etapas pode ser observada de

forma simplificada, ilustrando o mecanismo de polimerização em cadeia por poliadição do eteno para a obtenção do polietileno (Figura 2). Como se pode notar, a iniciação envolve a geração de radicais livres a partir do iniciador e sua adição ao monômero, formando o centro ativo. A propagação ocorre por sucessivas adições de unidades de eteno à cadeia em crescimento, enquanto a terminação se dá por recombinação ou desproporcionamento das cadeias radicais.

Figura 2- Etapas da polimerização em cadeia (iniciação, propagação e terminação)



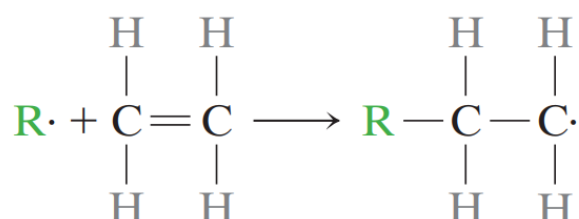
Fonte: Natarelli *et al.* (2022).

3.1.1.1.1 Iniciação

Na primeira etapa, denominada de iniciação, ocorre a geração de centros ativos. Conforme descrito por Callister (2020), um agente iniciador abre a ligação dupla do monômero, formando um radical livre que serve como o centro ativo para o crescimento da cadeia (Figura 3). Essa etapa desempenha um papel crucial no processo, pois determina a quantidade de

centros ativos presentes na reação. Adicionalmente, fatores operacionais como a temperatura, a concentração de reagentes e o tipo de meio reacional são elementos que influenciam diretamente a taxa dessa iniciação (Queiroz Júnior, 2018).

Figura 3 - Etapa de Iniciação da Reação de Polimerização



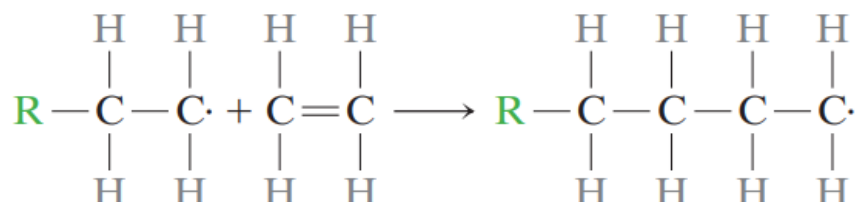
Fonte: Callister (2020).

R· representa o radical iniciador, enquanto o ponto (·) indica a presença de um elétron desemparelhado.

3.1.1.1.2 Propagação

A segunda etapa, a de propagação, ocorre a expansão da macromolécula, o centro ativo formado no início do processo se junta a outro monômero, criando um novo centro, com uma cadeia maior (Figura 4). Esse processo ocorre sucessivamente, promovendo o aumento contínuo da cadeia polimérica (Natarelli *et al.*, 2022). De acordo com Queiroz Junior (2018) “A taxa de propagação será proporcional à taxa de consumo de monômero e proporcional à taxa de produção de polímero”.

Figura 4 - Etapa de propagação da Reação de Polimerização



Fonte: Callister (2020).

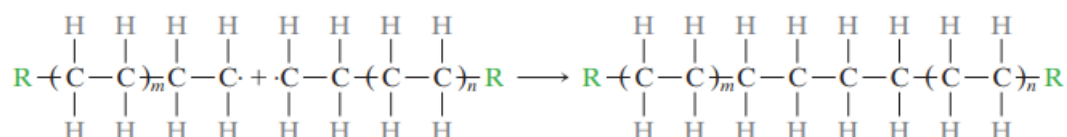
3.1.1.1.3 Terminação

Na terceira e última etapa, a de terminação, a macromolécula em crescimento é desativada, ou seja, para de crescer (Callister, 2020). Natarelli *et al* (2022) destaca que essa desativação pode acontecer através de dois métodos: combinação (Figura 5) ou por desproporcionamento (Figura 6).

A terminação pelo método de combinação se caracteriza pela junção de duas macromoléculas em crescimento no meio reacional. Assim, o encontro dessas moléculas resulta na interação dos centros ativos de cada uma delas, formando uma ligação de modo que as cadeias vão se combinar em uma única macromolécula. A macromolécula resultante apresenta elevada massa molar uma vez que sua massa molar corresponde à soma das massas molares das moléculas individuais que se combinaram. (Natarelli *et al.*, 2022 p.64).

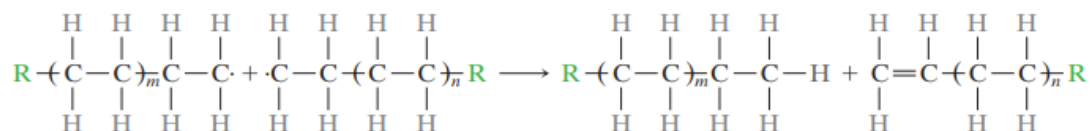
A terminação pelo desproporcionamento ocorre quando um hidrogênio do carbono adjacente àquele da extremidade de uma cadeia em crescimento se transfere para o carbono da extremidade de outra cadeia, também em crescimento. O carbono que transfere um átomo de hidrogênio para outra cadeia forma uma dupla ligação com o carbono da extremidade, eliminando o centro ativo. Por outro lado, o recebimento do hidrogênio elimina o centro ativo da cadeia receptora. (Natarelli *et al*, 2022 p.64).

Figura 5 - Terminação por combinação



Fonte: Callister (2020).

Figura 6 - Terminação por desproporcionamento



Fonte: Callister (2020).

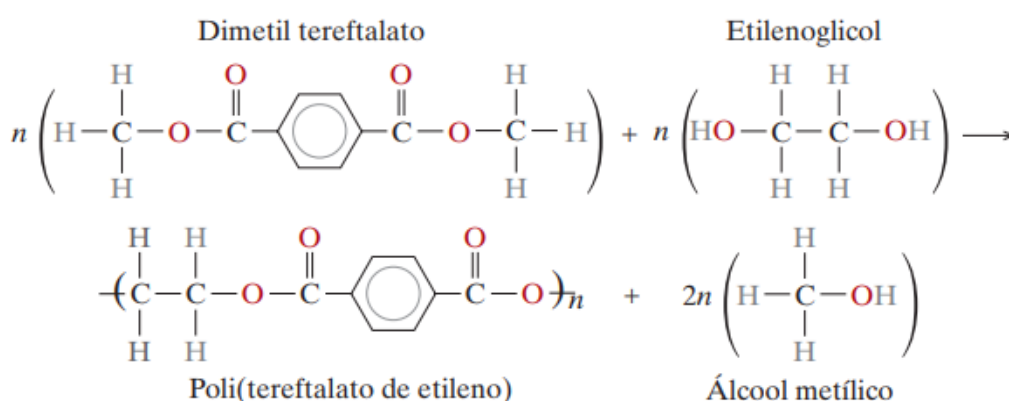
3.1.1.2 Polimerização em etapas ou policondensação

Diferente da polimerização em cadeia, na polimerização em etapas a formação do polímero é comandada pelas reações entre os grupos funcionais das moléculas. Outra diferença importante é que, frequentemente, esse mecanismo ocorre por meio de reações de condensação, nas quais há a eliminação de subprodutos de baixa massa molar, tais como água ou cloreto de hidrogênio (Callister, 2020; Ntarelli *et al.*, 2022).

Segundo Queiroz Junior (2018) os monômeros presentes nos grupos funcionais realizam a eliminação de outras moléculas do meio reacional. Além disso, de acordo com Ntarelli *et al* (2022) “a polimerização em etapas não necessita da presença de um iniciador para formação dos centros ativos. O iniciador é dispensado pois todos os monômeros são reativos, interagem e formam ligações pelo fornecimento de calor ao sistema reacional”.

Conforme Callister (2020), um esquema simplificado desse tipo de reação pode ser observado na síntese do poli(tereftalato de etileno), obtido pela reação entre o dimetil tereftalato e o etilenoglicol, com a consequente liberação de álcool metílico (Figura 7). Nesse processo, o crescimento ocorre de forma progressiva entre espécies reativas de diferentes massas molares, um comportamento que se distingue da polimerização em cadeia e influencia diretamente as propriedades do material final.

Figura 7 - Reação de policondensação para obtenção do poli(tereftalato de etileno)



Fonte: Callister (2020).

3.1.2 Técnicas de polimerização

Conforme expõe Saraiva (2020), os processos de polimerização podem ser classificados quanto ao meio reacional em homogêneos e heterogêneos. No âmbito homogêneo, a polimerização em massa caracteriza-se pela ausência de solventes ou diluentes, restringindo-se à interação direta entre monômero e iniciador. Essa aparente simplicidade metodológica, embora favoreça a obtenção imediata do produto, impõe sérios desafios operacionais, sobretudo no controle térmico e na rápida elevação da viscosidade durante o crescimento das cadeias.

Como resposta a tais limitações, a polimerização em solução introduz um solvente capaz de dissolver os reagentes, funcionando simultaneamente como diluente e moderador da dissipação energética. Todavia, essa maior estabilidade implica a necessidade de uma etapa adicional de separação do solvente, o que complexifica o processo (Saraiva, 2020).

No domínio heterogêneo, a polimerização em suspensão distingue-se pela dispersão do monômero em uma fase contínua imiscível, geralmente aquosa, estabilizada por agitação mecânica e agentes dispersantes. O resultado é a formação de polímeros em partículas ou esferas de pequena dimensão (Saraiva, 2020).

Em contraste, a polimerização em emulsão apresenta elevada eficiência, uma vez que os reagentes são dispersos em meio líquido com auxílio de surfactantes, gerando sistemas coloidalmente estáveis (Saraiva, 2020; Xavier *et al.*, 2020).

A técnica proporciona maior controle da viscosidade e da dissipação térmica, o que permite a síntese de polímeros de elevada massa molar (Santos, 2021; Saraiva, 2020). Sua relevância extrapola o campo estritamente técnico, alcançando aplicações estratégicas, como a produção de revestimentos biopoliméricos e filmes híbridos que integram matrizes hidrofílicas e componentes lipídicos (Xavier *et al.*, 2020).

Diante dos impactos ambientais dos polímeros sintéticos, o avanço das técnicas de polimerização requer o desenvolvimento de rotas sustentáveis. Nesse cenário, os biopolímeros destacam-se como uma alternativa viável para mitigar esses efeitos.

3.2 Biopolímeros

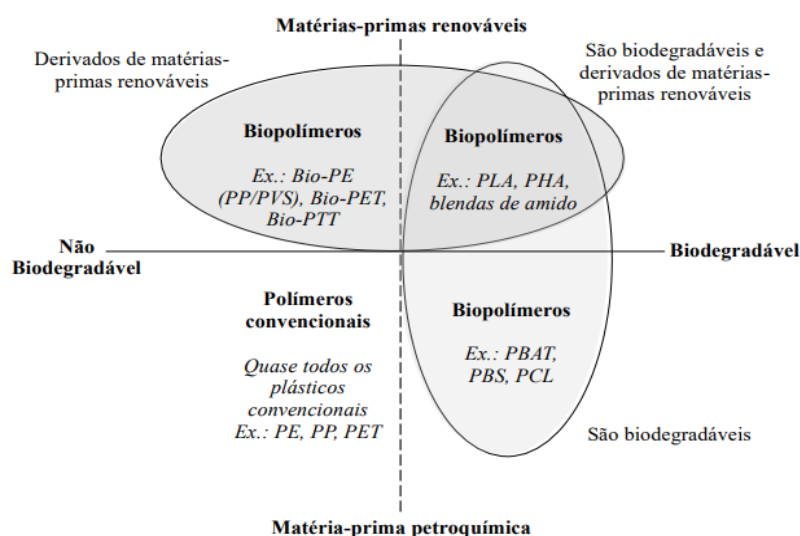
Os biopolímeros, também denominados polímeros naturais, constituem macromoléculas sintetizadas por organismos vivos, plantas, animais e microrganismos, a partir de fontes renováveis de carbono. Entre os mais abundantes, destacam-se os polissacarídeos,

como amido e celulose, cuja relevância decorre tanto da ampla disponibilidade quanto da diversidade funcional (Santos, 2021).

3.2.1 Classificação dos biopolímeros

Os biopolímeros podem ser classificados de acordo com sua origem e forma de obtenção em três grandes grupos: biopolímeros de origem natural, biopolímeros sintetizados por organismos e biopolímeros sintetizados a partir de monômeros naturais. Esta classificação facilita a compreensão geral das características moleculares, aplicações práticas e processos produtivos desses materiais, os quais vêm sendo amplamente investigados como alternativas sustentáveis e de menor impacto ecológico frente aos polímeros convencionais derivados do petróleo (Justino *et al.*, 2022).

Figura 8 - Esquema geral dos tipos de biopolímeros e suas subdivisões



Fonte: Santos (2021).

Contudo, a conceituação e a definição de "bioplástico" na literatura e na indústria não são estritamente consensuais. Conforme Jones (2020), os principais atributos desses materiais consistem tradicionalmente na biodegradabilidade e na sua origem renovável, frequentemente exemplificada pelo uso de matrizes como o milho ou a cana-de-açúcar. Sob uma ótica complementar, o portal Ecycle [s.d.] pondera que o termo não deveria se restringir apenas a polímeros biodegradáveis ou compostáveis, englobando também plásticos convencionais que apresentem aditivos de degradação, além de materiais de base biológica que não necessariamente se decompõem no meio ambiente.

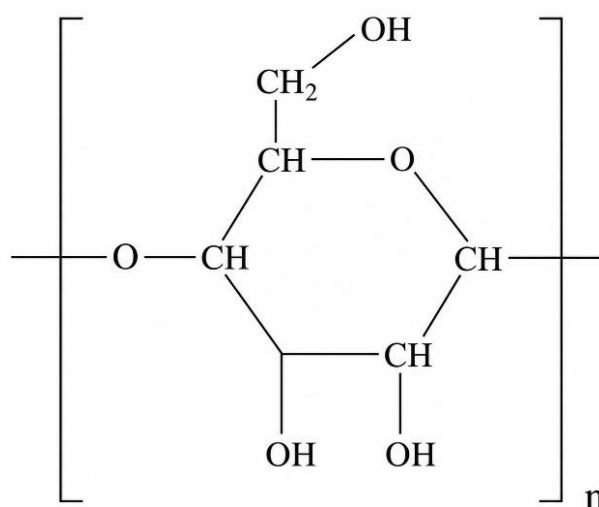
3.2.1.1 Biopolímeros de origem natural

Os biopolímeros de origem natural são aqueles extraídos diretamente de organismos vivos, como plantas e animais, dispensando a necessidade de processos complexos de síntese química em sua cadeia principal (Justino *et al.*, 2022). Entre os principais exemplos destacados na literatura estão a celulose, o amido, a quitina, além de diversas proteínas e ceras vegetais (Santos, 2021). Sob a ótica da ciência e engenharia de materiais, esses polímeros naturais desempenham papéis biológicos e fisiológicos cruciais na natureza (Callister, 2020).

No caso do amido, sua função primordial é atuar como reserva energética vegetal, sendo encontrado em tubérculos, como a batata e a mandioca, em cereais, como o milho e o arroz, e em sementes variadas. Estruturalmente, ele compõe-se de duas frações macromoleculares: a amilose, de conformação linear, e a amilopectina, de conformação ramificada. A obtenção desse polissacarídeo, em escala laboratorial ou industrial, dá-se por meio da trituração da matéria-prima vegetal, seguida de processos de decantação em água e posterior secagem (Gomes, 2019).

A celulose, por sua vez, desempenha papel estrutural essencial nas paredes celulares das plantas, representando entre 20% e 40% da massa seca vegetal. Sua composição baseia-se em unidades de glicose ligadas linearmente, o que lhe confere elevada massa molar e alto grau de cristalinidade, características que explicam sua infusibilidade e insolubilidade em estado nativo (Justino *et al.*, 2022). A Figura 9 mostra a estrutura química da celulose.

Figura 9 - Estrutura química da celulose



Fonte: Canevaloro Junior (2006 *apud* Saraiva, 2020).

3.2.1.2 Biopolímeros sintetizados por organismos

Esta classe compreende os biopolímeros produzidos diretamente pelo metabolismo de microrganismos, tais como bactérias, fungos e algas. Os poli-hidroxicarboxilatos (PHAs), que incluem compostos de grande relevância como o poli-hidroxibutirato (PHB), constituem os exemplos mais expressivos dessa categoria, sendo acumulados intracelularmente por bactérias como fonte de reserva energética (Santos, 2021). Esses materiais ganham destaque tecnológico por exibirem propriedades físico-mecânicas semelhantes às dos plásticos sintéticos convencionais (provenientes de matriz fóssil), porém com as vantagens ecológicas de serem completamente biodegradáveis e oriundos de fontes 100% renováveis (Santos, 2021; Justino *et al.*, 2022).

3.2.1.3 Biopolímeros sintetizados a partir de monômeros naturais

Os biopolímeros pertencentes a este grupo são obtidos por meio de rotas de processamento industrial que envolvem a polimerização química de monômeros previamente extraídos de fontes renováveis. O principal expoente comercial dessa classe é o ácido polilático (PLA), sintetizado industrialmente a partir do ácido láctico derivado da fermentação biológica de açúcares e amidos vegetais. Estes materiais unem o desempenho dos polímeros sintéticos ao caráter sustentável das fontes renováveis, servindo como substitutos eficientes para os plásticos tradicionais (Santos, 2021; Justino *et al.*, 2022).

3.2.2 Modificações

Apesar de sua ampla ocorrência e vantagens ecológicas, os polímeros naturais em estado puro apresentam limitações tecnológicas, tais como elevada fragilidade mecânica e acentuada sensibilidade à umidade. Por essa razão, torna-se necessário realizar modificações químicas ou desenvolver blendas e compósitos funcionais, de modo a ampliar sua aplicabilidade industrial e atender às rígidas exigências de desempenho do mercado contemporâneo (Gomes, 2019).

A celulose, em sua forma nativa, apresenta infusibilidade e insolubilidade, características explicadas pelas intensas interações intermoleculares entre cadeias lineares de glicose. Essa rigidez estrutural, embora essencial para a função biológica das plantas, limita sua aplicação tecnológica. Por isso, torna-se necessário recorrer a modificações químicas, como a

acetilação, que substitui grupos hidroxila (-OH) por outros grupos funcionais. Tal processo não apenas viabiliza a obtenção de derivados como o acetato de celulose, mas também amplia o espectro de propriedades físico-químicas, permitindo sua utilização em áreas como membranas, filmes e fibras de alto desempenho (Santos, 2021).

De modo complementar, o amido, apesar de sua abundância e relevância como reserva energética vegetal, também exige transformações estruturais para se tornar funcional em aplicações industriais. A gelatinização, promovida por calor e cisalhamento, rompe a organização granular original e converte o polímero em amido termoplástico (TPS), cuja processabilidade se aproxima da dos polímeros sintéticos (Moreira *et al.*, 2022; Santos, 2021).

Nesse contexto, a adição de plastificantes, como o glicerol, desempenha papel crucial, pois aumenta a mobilidade das cadeias moleculares, reduzindo a rigidez e conferindo flexibilidade ao material. Esse processo fundamenta a transição do amido de um polímero com propriedades mecânicas limitadas para um sistema versátil, direcionado à indústria de embalagens (Gonçalves, 2018).

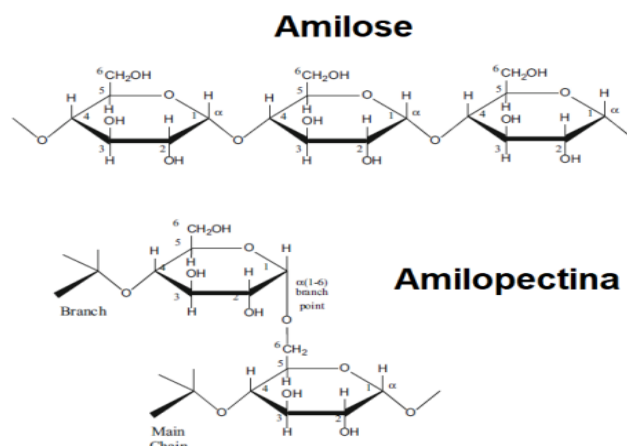
3.3 Principais biopolímeros

3.3.1 Amido

O amido, amplamente encontrado no meio ambiente, pertence à mesma classe de compostos que a celulose. Esse polissacarídeo serve como reserva energética nas plantas superiores. Sua composição inclui dois principais componentes: a amilose, uma cadeia linear de glicose insolúvel em água fria, e a amilopectina, também formada por unidades de glicose, porém organizada em uma estrutura altamente ramificada (Santos, 2021)

A amilose apresenta uma estrutura essencialmente linear, enquanto a amilopectina possui uma configuração altamente ramificada (Figura 10), o que resulta em diferentes viscosidades nas soluções formadas (Matos *et al.*, 2023). Essa divergência influencia propriedades como a formação de filmes funcionais, sendo um aspecto de grande relevância na manufatura de biopolímeros (Santos, 2021).

Figura 10 - Estrutura molecular da amilose e da amilopectina



Fonte: Matos *et al.* (2023).

De acordo com Queiroz Júnior (2018), diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no cenário científico para viabilizar e otimizar a aplicação do amido em materiais poliméricos comerciais, voltados principalmente a atribuir propriedades de biodegradação aos polímeros convencionais por meio de blendas. Durante o processamento térmico ou a degradação desses materiais, os fenômenos de desidratação e despolimerização provocam e intensificam a cisão das cadeias do polissacarídeo; nesse sentido, a água gerada por condensação intermolecular ou intramolecular das hidroxilas do amido atua como a principal substância que impulsiona o processo de degradação térmica do material (Queiroz Júnior, 2018).

3.3.2 Poli(ácido láctico) (PLA)

O polilactato, comumente denominado ácido polilático (PLA), é um poliéster termoplástico pertencente à família dos alifáticos. O processo básico de obtenção desse material se inicia com a síntese do ácido láctico, gerado por meio da fermentação bacteriana de carboidratos extraídos de matérias-primas renováveis ricas em amido ou glicose, tais como o milho, o arroz, o trigo, a beterraba e a batata (Queiroz Júnior, 2018).

Dessa forma, o PLA é produzido a partir de fontes de carbono totalmente renováveis, a exemplo do amido de milho ou da cana-de-açúcar. Industrialmente, o processamento e a obtenção ocorrem de maneira sequencial em duas etapas principais. A primeira consiste na via biotecnológica, envolvendo a fermentação dos açúcares vegetais para a obtenção do monômero (ácido láctico ou o dímero cíclico intermediário, o lactídeo). A segunda etapa envolve a polimerização química propriamente dita, que pode ocorrer por meio da rota de condensação

direta do ácido láctico ou, majoritariamente em escala comercial, pela polimerização por abertura de anel do lactídeo (Queiroz Júnior, 2018). Ambas as rotas tecnológicas convergem para a consolidação de um polímero biodegradável com excelentes propriedades e ampla versatilidade fabril.

De acordo com Santos (2021), a maior parte do volume de PLA produzido globalmente é destinada ao mercado de embalagens rígidas e flexíveis, impulsionada fortemente pelo seu apelo de biodegradabilidade e compostagem. Graças ao seu balanço de propriedades, que inclui boa processabilidade pelos métodos tradicionais de transformação, alta rigidez, transparência aceitável e moderada resistência térmica sob condições de uso, o PLA também vem expandindo seu campo de aplicações para setores como a indústria têxtil (fibras e tecidos), insumos para a agricultura moderna, componentes eletroeletrônicos e aparatos domésticos (Santos, 2021).

3.3.3 Poli-hidroxialcanoatos (PHAs)

O poli-hidroxialcanoato (PHA) constitui um poliéster totalmente biodegradável e biocompatível. Quando introduzido em ambientes dotados de atividade microbiana ativa, ele sofre biodegradação natural e se decompõe de forma espontânea, sem deixar resíduos persistentes ou subprodutos prejudiciais ao ecossistema (Santos, 2021).

O PHA é sintetizado biologicamente por cepas bacterianas a partir da metabolização de carboidratos. Esses microrganismos conseguem converter eficientemente açúcares extraídos da cana-de-açúcar e do milho, ou ainda óleos vegetais, em poliésteres intracelulares que atuam como sua fonte de reserva energética. Todavia, dependendo da rota biotecnológica empregada, o PHA também pode ser sintetizado com o auxílio de precursores ou coprodutos derivados de fontes não renováveis, o que amplia a flexibilidade do seu processo produtivo (Queiroz Júnior, 2018).

Em virtude de sua natureza biocompatível, o PHA encontra ampla aplicação na área médica e da saúde, sendo direcionado para a confecção de fios de sutura reabsorvíveis, implantes de liberação controlada de fármacos e moldes aplicados à engenharia de tecidos. Além disso, suas propriedades físicas e mecânicas mimetizam o comportamento de plásticos tradicionais de matriz fóssil (como o polipropileno), permitindo que ele atue como uma alternativa tecnicamente viável e ecologicamente correta aos polímeros derivados do petróleo em múltiplas aplicações de engenharia (Santos, 2021).

3.4 Ceras naturais como matriz polimérica

As ceras naturais constituem misturas complexas de compostos orgânicos denominados cerídeos, pertencentes à classe dos lipídios. Estruturalmente, são formadas por ésteres resultantes da reação entre ácidos graxos e álcoois graxos superiores de cadeia longa. Sua hidrólise promove a liberação desses componentes, confirmando sua natureza química característica (Forezi *et al.*, 2022).

A ceras naturais podem ser provenientes de vegetais, animais ou minerais (Forezi *et al.*, 2022). As ceras de origem vegetais são encontradas principalmente na superfície externa das plantas terrestres, onde atuam como película protetora para a redução da perda de água pelos tecidos vegetais e contra estresses ambientais (Pashova, 2023). Entre os exemplos principais, destacam-se as ceras de carnaúba, candelila, farelo de arroz e girassol (Forezi *et al.*, 2022; Pashova, 2023).

As ceras animais são biossintetizadas e secretadas para funções estruturais e protetoras, como ocorre com a cera de abelha e a lanolina, enquanto as ceras minerais são obtidas de depósitos fósseis ou do refino do petróleo, incluindo produtos como a parafina e os petrolatos purificados (Forezi *et al.*, 2022).

3.4.1 Propriedades das ceras

As ceras naturais caracterizam-se por sua elevada hidrofobicidade, propriedade associada à presença de longas cadeias de hidrocarbonetos e compostos graxos predominantemente apolares, o que lhes confere baixa afinidade pela água e reduzida solubilidade em meios aquosos (Forezi *et al.*, 2022; Souza, 2025).

Outra característica relevante é o comportamento térmico dessas substâncias. As ceras apresentam pontos de fusão que variam aproximadamente entre 35 °C e 100 °C, dependendo de sua composição química e origem, o que favorece sua aplicação em diferentes processos industriais (Forezi *et al.*, 2022).

A cera de carnaúba, por exemplo, destaca-se pelo elevado ponto de fusão, situado entre 79 °C e 85 °C, sendo amplamente empregada em formulações que requerem maior resistência ao calor (Forezi *et al.*, 2022; Pashova, 2023). Além disso, as ceras apresentam excelentes propriedades de barreira, reduzindo a permeabilidade ao vapor de água e limitando a difusão de gases, como o oxigênio, contribuindo para a proteção de produtos sensíveis contra alterações físico-químicas durante o armazenamento (Pashova, 2023; Souza, 2025).

3.4.2 Aplicação das ceras naturais em biopolímeros

Essas propriedades justificam a ampla aplicação das ceras naturais em sistemas biopoliméricos e revestimentos alimentícios. No setor de alimentos, são frequentemente utilizadas em revestimentos comestíveis aplicados a frutas, hortaliças e confeitos, auxiliando no controle das trocas gasosas, na redução da perda de água e no aumento da vida útil dos produtos, sempre em conformidade com regulamentações estabelecidas por órgãos como a ANVISA e o FDA (Pashova, 2023; Silva, 2023).

Além disso segundo Souza (2025), são empregadas na produção de filmes e embalagens biodegradáveis, contribuindo para o desenvolvimento de materiais sustentáveis destinados à substituição de plásticos derivados do petróleo e à redução dos impactos ambientais associados ao descarte desses materiais.

As ceras também são frequentemente combinadas com amido e outros biopolímeros, como o poli(ácido lático) (PLA) e a policaprolactona (PCL), visando melhorar propriedades mecânicas, térmicas e de barreira dos materiais obtidos. Estudos demonstram que a incorporação de diferentes ceras vegetais pode influenciar significativamente as propriedades físicas, mecânicas e de barreira de filmes biodegradáveis à base de amido (Souza, 2025).

Nessas formulações, as ceras atuam como agentes hidrofóbicos e impermeabilizantes, ocupando espaços intermoleculares da matriz polimérica e reduzindo a absorção de umidade. Como consequência, promovem alterações importantes nas propriedades mecânicas dos materiais, influenciando parâmetros como resistência, alongamento e flexibilidade dos bioplásticos finais (Silva, 2023; Souza, 2025).

3.5 Fibras naturais

As fibras naturais vêm sendo amplamente estudadas como agentes de reforço em matrizes poliméricas, devido à combinação de propriedades mecânicas satisfatórias, expressiva disponibilidade e menor impacto ambiental quando comparadas aos materiais de reforço sintéticos convencionais (Silva; Campelo, 2021).

As fibras naturais podem ser classificadas de acordo com sua origem biológica em vegetais, animais e minerais, sendo as fibras vegetais as mais empregadas em aplicações tecnológicas e industriais de engenharia. O uso dessa classe é amplamente favorecido por características ecológicas e operacionais intrínsecas, tais como a renovabilidade, a

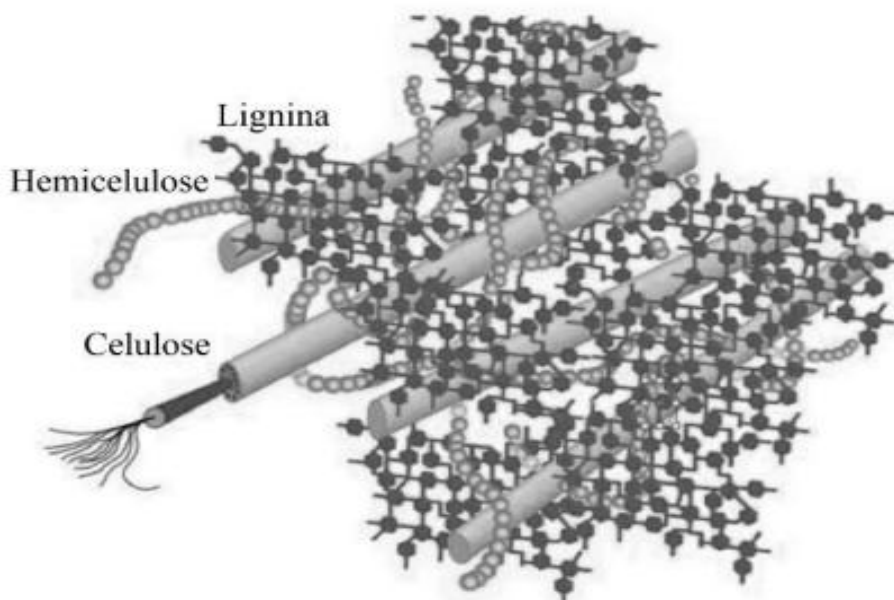
biodegradabilidade, a baixa densidade e o custo reduzido de obtenção, além de sua ampla disponibilidade geográfica em diferentes regiões do mundo (Melo, 2021; Silva; Campelo, 2021). Essas características sinérgicas tornam as fibras vegetais alternativas promissoras e economicamente viáveis para o desenvolvimento de compósitos poliméricos de menor pegada de carbono.

3.5.1 Fibras vegetais

As fibras vegetais são classificadas como resíduos lignocelulósicos, por apresentarem em sua composição três principais componentes orgânicos: celulose, hemicelulose e lignina (Doroskevich, 2022).

A organização da estrutura lignocelulósica das fibras vegetais, evidenciando a interação entre celulose, hemicelulose e lignina (Figura 11). Essa estrutura hierárquica é responsável pelas propriedades mecânicas das fibras, como resistência e rigidez. A presença desses componentes influencia diretamente o desempenho das fibras quando utilizadas como reforço em matrizes poliméricas.

Figura 11 - Representação da composição lignocelulósica



Fonte: WANG *et al.* (2017 *apud* Dinis, 2025).

3.5.1.1 Celulose

Quimicamente, a celulose é um polímero de cadeia longa e linear, constituído pela repetição de monômeros de glicose vinculados por ligações β -(1 $\rightarrow$ 4)-glicosídicas. Essas macromoléculas se agrupam perfeitamente através de pontes de hidrogênio, criando uma estrutura macromolecular que intercala regiões altamente organizadas (cristalinas) e zonas desordenadas (amorfas) (Doroskevich, 2022).

Sendo a substância orgânica mais abundante do planeta, ela desempenha o papel de principal componente de sustentação e esqueleto das fibras vegetais. Devido a essa forte coesão intermolecular, a celulose exibe excelente estabilidade dimensional e alta capacidade de suportar cargas. Na área de engenharia de materiais, essa rigidez intrínseca faz dela o elemento essencial para atuar como reforço em compósitos poliméricos, observando-se que plantas com maior concentração de celulose conferem propriedades superiores de rigidez e resistência à tração ao material final (Silva; Campelo, 2021).

Vale notar que a proporção entre as fases amorfa e cristalina varia de acordo com a espécie vegetal e os tratamentos químicos ou físicos aplicados à fibra, modificando de forma direta a estabilidade térmica, a capacidade de absorção de água e a resposta mecânica do compósito (Doroskevich, 2022).

3.5.1.2 Hemiceluloses

Ao contrário do arranjo retilíneo da celulose, as hemiceluloses são polissacarídeos de baixa massa molecular que apresentam uma estrutura ramificada e essencialmente amorfa. Elas ocupam entre 20% e 35% da biomassa lignocelulósica total e são formadas por uma mistura de diversos açúcares, tais como xilose, arabinose, manose, glicose e galactose (Melo, 2021). Na arquitetura da parede celular das plantas, a função primordial dessas moléculas é atuar como uma ponte de ligação física e química, conectando os microfilamentos de celulose à matriz de lignina para unificar a estrutura vegetal.

Por possuírem uma geometria desorganizada e uma grande quantidade de grupos hidroxila expostos, as hemiceluloses têm forte afinidade com a água, sendo as principais responsáveis por regular os índices de absorção de umidade e o consequente inchamento da fibra vegetal (Doroskevich, 2022). Além disso, o seu arranjo ramificado faz com que a sua estabilidade frente ao calor seja reduzida. Elas sofrem degradação térmica em temperaturas

significativamente mais baixas que as da celulose, estabelecendo um limite térmico crucial que deve ser respeitado durante o processamento térmico industrial de biocompósitos (Silva; Campelo, 2021).

3.5.1.3 Lignina

Diferentemente dos polissacarídeos que integram a parede celular, a lignina se comporta como um polímero tridimensional e aromático de alta complexidade, constituído por unidades de fenilpropanoides fortemente unidas por ligações cruzadas que recobrem as microfibrilas. No vegetal, sua missão é atuar como um agente cimentante hidrofóbico (repelente à água) que envolve e une as porções de celulose e hemicelulose (Doroskevich, 2022).

De acordo com Doroskevich (2022), essa composição não apenas consolida a arquitetura das plantas, assegurando a rigidez e a sustentação mecânica vertical, mas também serve como um escudo defensivo e barreira protetora contra intempéries climáticas e o ataque biológico de microrganismos. Adicionalmente, essa natureza hidrofóbica é o que garante a impermeabilidade dos vasos condutores do vegetal e diminui a absorção de água por parte das fibras.

No desenvolvimento de novos materiais e biocompósitos, a presença desse polímero é considerada estratégica, uma vez que contribui positivamente para desacelerar os processos de biodegradação e elevar o patamar de estabilidade e resistência térmica dos compostos lignocelulósicos (Melo, 2021). Segundo Silva e Campelo (2021), a quantidade de lignina presente na fibra afeta diretamente o desempenho do compósito polimérico, atuando tanto na qualidade da adesão e ancoragem na interface entre a fibra e a matriz plástica quanto nas propriedades mecânicas definitivas obtidas no material final.

Diante dessas características, as fibras extraídas das folhas da carnaúba (*Copernicia prunifera*) ganham destaque na fabricação de biocompósitos. Seus filamentos contam com uma distribuição equilibrada de celulose, hemicelulose e lignina, o que proporciona uma excelente compatibilidade de reforço em matrizes poliméricas e desenha uma alternativa tecnológica e sustentável de grande valor (Melo, 2021).

3.6 Carnaúba

A carnaubeira, palmeira endêmica do semiárido nordestino brasileiro, concentra-se sobretudo nos estados do Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte e Maranhão, sendo considerada

uma espécie exclusiva do país. Possuindo uma variedade de aplicações na indústria pelo aproveitamento integral da planta em diferentes usos, o que evidencia sua relevância socioeconômica. (Silva *et al.*, 2025; Pinho, 2021; Ribeiro, 2024). A Figura 12 apresenta um exemplar da palmeira carnaúba, destacando sua estrutura característica e adaptação ao ambiente semiárido. Observa-se que suas folhas são a principal fonte de obtenção da cera e das fibras utilizadas neste estudo. Essa disponibilidade natural reforça o potencial da espécie como matéria-prima sustentável para o desenvolvimento de biopolímeros.

Figura 12 - Palmeira carnaúba (*Copernicia prunifera*)



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Do ponto de vista ecológico, a carnaubeira apresenta notável resistência às condições climáticas adversas, permanecendo verde mesmo em períodos prolongados de estiagem. Essa característica, somada à sua longevidade que pode alcançar até dois séculos, reforça sua importância como espécie adaptada ao semiárido. Em termos produtivos, a maturidade para extração da cera ocorre por volta dos dez anos de idade, o que estabelece um ciclo relativamente longo até o início da exploração econômica (Pinho, 2021).

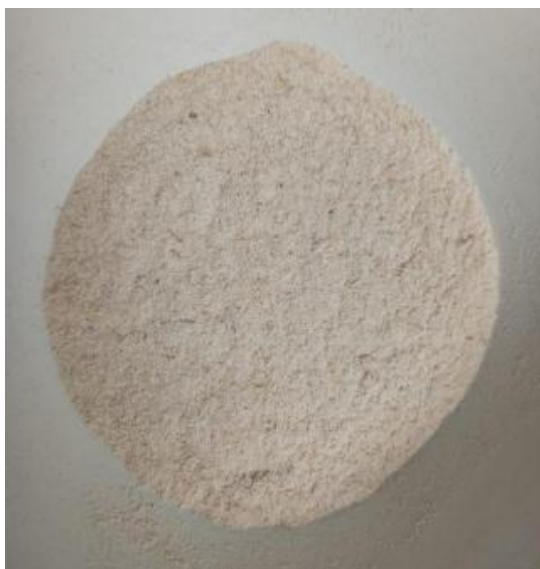
Entretanto, a cadeia produtiva enfrenta desafios que transcendem a dimensão biológica. De um lado, há questões sociais relacionadas à informalidade e à precarização das condições

de trabalho nas comunidades extrativistas; de outro, emergem problemas ambientais, como a invasão da espécie conhecida como “unha-do-diabo”, que compromete a vitalidade dos carnaubais e ameaça a sustentabilidade do sistema produtivo (Associação Caatinga, 2013).

3.6.1 Cera de carnaúba

A cera de carnaúba é obtida a partir do pó cerífero presente nas folhas da palmeira, cuja função fisiológica consiste em proteger a planta contra a perda hídrica, a radiação solar e a ação de fungos. Esse material apresenta diferentes classificações comerciais, sendo a Cera Tipo 1 (Figura 13) considerada a mais nobre, por derivar do chamado “pó de olho”, extraído de folhas jovens e de coloração clara (Andrade et al., 2018; Pinho, 2021; Ribeiro, 2024).

Figura 13 - Pó de olho da carnaúba



Fonte: Ribeiro (2024).

Em contraste, as Ceras Tipos 3 e 4 são obtidas do “pó de palha”, proveniente de folhas mais maduras e escuras, o que explica suas diferenças de cor e pureza (Andrade et al., 2018; Pinho, 2021; Ribeiro, 2024). Como apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Pó de palha da carnaúba



Fonte: Ribeiro (2024).

Do ponto de vista físico-químico, a cera de carnaúba distingue-se por apresentar ponto de fusão elevado, variando entre 80 °C e 86 °C. Essa característica confere estabilidade térmica e amplia sua aplicabilidade em diversos setores industriais. O que pode ser visualizado na Figura 15, referente à sua forma purificada na classificação Tipo I (Pinho, 2021; Ribeiro, 2024).

Figura 15 - Cera de carnaúba Tipo I



Fonte: Ribeiro (2024).

Adicionalmente, as diferentes classificações comerciais da cera podem ser observadas, incluindo a Cera Tipo III e a Cera Tipo IV, as quais apresentam variações de cor e pureza (Pinho, 2021; Ribeiro, 2024), conforme ilustrado nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

Figura 16 - Cera de carnaúba Tipo III



Fonte: Ribeiro (2024).

Figura 17 - Cera de carnaúba Tipo IV



Fonte: Ribeiro (2024).

O processo produtivo, por sua vez, envolve etapas sucessivas de coleta das folhas, secagem, extração do pó, refino e classificação, assegurando a padronização do produto final (Ribeiro, 2024). O fluxograma (Figura 18) sintetiza as etapas do processo produtivo da cera de carnaúba, desde a coleta das folhas até a obtenção do produto final. Observa-se a sequência de operações que incluem secagem, extração do pó e refino, evidenciando um processo relativamente simples e de base extrativista.

Figura 18 - Fluxograma do processo produtivo da cera de carnaúba



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2024).

Em termos de usos, a versatilidade da cera de carnaúba é notável. Ela é amplamente empregada em cosméticos, medicamentos e alimentos, atuando, por exemplo, como revestimento de frutas, comprimidos e na formulação de batons (Gomes, 2019; Pinho, 2021; Ribeiro, 2024). Além disso, sua elevada resistência e propriedades isolantes permitem aplicações em componentes eletrônicos (Pinho, 2021; Ribeiro, 2024). Essas características explicam sua relevância estratégica na formulação de biopolímeros com propriedades de barreira, reforçando o papel da carnaúba como recurso natural de alto valor agregado.

3.6.2 Fibras de carnaúba

Entre as diversas fontes vegetais disponíveis no cenário nacional, destaca-se a carnaúba (*Copernicia prunifera*), espécie endêmica e nativa do Nordeste brasileiro que é amplamente reconhecida por seu elevado potencial socioeconômico. Além da consolidada exploração industrial para a produção de ceras, suas folhas fornecem fibras lignocelulósicas robustas com alto potencial de aplicação em materiais compósitos comerciais. O aproveitamento dessas frações agrega valor de mercado a resíduos agrícolas e contribui diretamente para o manejo sustentável e o aproveitamento integral da biomassa local (Melo, 2021; Virginio, 2024).

As fibras de carnaúba são classificadas como fibras de folhas, obtidas após o processo de secagem e batimento da palha, etapa em que ocorre simultaneamente a retirada da cera (Melo, 2021; Santos, 2015). Geometricamente, apresentam seção transversal aproximadamente elíptica. Do ponto de vista microestrutural, são compostas por múltiplas fibras elementares (células) dispostas longitudinalmente e unidas por pectinas e outros materiais não celulósicos, o que explica sua elevada resistência mecânica (Carvalho, 2011). A superfície, por sua vez, apresenta irregularidades e pequenas reentrâncias denominadas fibrilas, originalmente recobertas por uma camada de cera que atua como barreira contra a perda de água em períodos de estiagem (Carvalho, 2011; Santos, 2015).

Quimicamente, trata-se de um material lignocelulósico cuja composição varia conforme o método de análise e o estado da amostra. Na fibra in natura, observa-se celulose (58,04%), lignina (19,03%), hemicelulose (14,02%), umidade (7,53%) e cinzas (1,80%) (Carvalho, 2011). Já no pó da palha micronizado, os valores se alteram: holocelulose (58,06%), alfa-celulose (40,22%), hemicelulose (17,84%), extrativos (12,37%), lignina Klason (11,88%), umidade (9,01%) e cinzas (7,20%) (Melo, 2021).

Fisicamente, a densidade da fibra não tratada é de aproximadamente 1,34 g/cm³. Em termos mecânicos, apresenta resistência à tração média de 227 MPa e módulo de elasticidade médio de 8,76 GPa. Estruturalmente, é considerada semicristalina, com presença de celulose dos tipos I e IV. No aspecto térmico, observa-se perda de umidade e solventes até cerca de 132 °C, enquanto a degradação dos principais componentes (celulose, hemicelulose e lignina) ocorre em temperaturas superiores a 250 °C (Carvalho, 2011).

As fibras de carnaúba possuem usos tradicionais e modernos. Historicamente, são empregadas na confecção de cordas e artesanatos, como cestas, esteiras e chapéus (Carvalho, 2011; Santos, 2015; Souza, 2020). No setor da construção e energia, destacam-se em coberturas rústicas e como biomassa para geração de energia térmica em caldeiras (Melo, 2021; Santos, 2015). Além disso, podem ser utilizadas como material de isolamento térmico, especialmente na forma de esteiras para revestimento de dutos de vapor, e no desenvolvimento de biocompósitos isolantes (Santos, 2015).

No campo dos materiais avançados, seu uso como reforço em compósitos poliméricos biodegradáveis é particularmente relevante. As fibras podem ser incorporadas a matrizes de PHB, amido ou mesmo na produção de madeira plástica (WPC), contribuindo para o desenvolvimento de biocompósitos com propriedades mecânicas superiores (Carvalho, 2011; Melo, 2021; Santos, 2015). Dessa forma, as fibras extraídas da carnaúba apresentam-se como

uma alternativa estratégica e promissora para o desenvolvimento de biopolímeros e biocompósitos dotados de características de engenharia e apelo ambiental altamente favoráveis.

3.7 Sustentabilidade e impacto ambiental dos biopolímeros

Atualmente, ainda há escassez de normas para a padronização que oriente a obtenção de matérias-primas, bem como para os tipos de biopolímeros produzidos. Além disso, não se tem também uma rotulagem consistente que indique se um produto é realmente biodegradável. A falta dessa normalização traz um desafio para os usuários, pois dificulta saber se, de fato, estão realizando uma escolha que seja benéfica ao meio ambiente, ou seja, optando pelos biopolímeros ao invés dos plásticos convencionais derivados do petróleo (Kuchta, 2022).

Esse cenário de incertezas normativas se soma ao fato de que o setor produtivo de biopolímeros ainda está em fase inicial. No ano de 2019, esse tipo de material representava apenas 1% da produção global de plásticos. No entanto, a preocupação com os impactos ambientais causados pelo plástico e o aumento das orientações normativas sobre o descarte inadequado desses resíduos têm impulsionado o interesse e os investimentos nesse segmento (Kuchta, 2022).

Segundo Soldera (2022), “Com as constantes discussões sobre a contaminação ao meio ambiente devido ao descarte incorreto de plásticos, os biopolímeros vêm ganhando cada vez mais espaço”. Calcula-se que a indústria desses materiais cresça entre 10% e 14% no período de 2020 a 2025, o que pode contribuir significativamente para combater um dos maiores desafios ambientais atuais: a poluição causada pelo plástico (Kuchta, 2022).

Cada vez mais eles vêm ganhando espaço e sendo mais utilizados no dia a dia, um dos principais fatores que contribui para isso são suas propriedades de alta durabilidade e descarte prático. Entretanto, assim como ocorre em outros contextos, também existem aspectos negativos, pois a forma como alguns biopolímeros sofrem biodegradação pode gerar gás metano, um dos principais gases do efeito estufa (Ecycle, [s.d.]). A tabela 1 abaixo apresenta algumas vantagens e desvantagens dos bioplásticos que devemos levar em consideração, de acordo com a Europlas [s.d.].

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos bioplásticos

Vantagens	Produzidos a partir de fontes renováveis, então usam menos petróleo.
	Na produção, liberam menos gases de efeito estufa que os plásticos comuns.
	Em comparação aos plásticos tradicionais levam menos tempo para se degradar
	Alguns tipos (como PLA e PHB), não são tóxicos e podem ser usados em embalagens de alimentos.
Desvantagens	Os principais recursos dos bioplásticos são as plantações, então para produzi-los utiliza-se fertilizantes, pesticidas e processos químicos que poluem.
	O uso da terra para plantar matéria-prima ocupa áreas que poderiam ser destinadas à produção de alimentos.
	São mais caros que os plásticos derivados do petróleo.
	A degradação de alguns tipos de bioplásticos depende das condições específicas. Se forem destinados a aterros juntos com outros resíduos podem não se decompor corretamente.

Fonte: Adaptado de Europlas [s.d.].

Diante desse cenário, o desenvolvimento de biopolímeros reforçados com fibras naturais surge como uma alternativa capaz de conciliar desempenho tecnológico e responsabilidade ambiental (Melo, 2021). A utilização da cera e das fibras de carnaúba apresenta potencial para agregar valor a uma matéria-prima renovável amplamente disponível no Nordeste brasileiro (Melo, 2021; Ribeiro, 2024), promovendo o aproveitamento integral da biomassa e fortalecendo práticas alinhadas aos princípios da sustentabilidade (Virginio, 2024). Assim, a aplicação desses recursos naturais na produção de novos materiais pode contribuir para a redução dos impactos ambientais associados aos polímeros convencionais e para o avanço de soluções mais sustentáveis para a indústria de materiais (Santos, 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa usa uma abordagem experimental, que serve para testar e observar como um objeto e suas variáveis se comportam na prática (Silva, 2024). O objetivo principal aqui é criar e avaliar um biopolímero feito com a cera e as fibras das folhas de carnaúba (*Copernicia prunifera*). A análise é qualitativa, pois busca entender e interpretar os resultados que surgiram durante a fabricação desse bioplástico. Além disso, o estudo é classificado como uma pesquisa aplicada, já que tenta resolver um problema bem prático: encontrar um substituto para os plásticos que vêm do petróleo (Silva, 2024).

Os testes foram feitos no Laboratório de Química Geral da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), no campus de Pau dos Ferros (RN). As atividades aconteceram entre os anos de 2025 e 2026, passando pelas fases de preparar os materiais, processar as amostras e fazer todos os ensaios para avaliar o bioplástico.

4.1 Obtenção da matéria-prima

4.1.1 Cera de Carnaúba

A cera empregada (Figura 19) como matriz hidrofóbica na síntese dos biopolímeros foi a cera de carnaúba comercial da marca Luazul (Cera de Carnaúba Especial para Madeiras), produzida pela empresa Luazul Indústria e Comércio de Produtos de Limpeza EIRELI-EPP, situada no município de Macaíba, Rio Grande do Norte. O insumo foi obtido em embalagem comercial com massa líquida de quatrocentas gramas (400 g), pertencente ao lote de fabricação número zero vinte e nove (029).

Figura 19 - Cera de carnaúba comercial utilizada



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

De acordo com as especificações técnicas e dados químicos fornecidos pelo fabricante, a composição estrutural do produto é constituída por cera de carnaúba, agentes emulsificantes, coadjuvantes, conservantes, fragrância e veículo.

4.1.2 Extração da fibra de Carnaúba

Para a realização da primeira etapa desse estudo, realizou-se a coleta das palhas de carnaúba, que já se encontravam secas na zona rural do município de Marcelino Vieira (RN), como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 - Imagem representativa da Palha de carnaúba seca



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A palha da carnaúba apresenta uma composição lignocelulósica significativa, sendo formada majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina. De acordo com Santos (2015), “a fibra da palha da carnaúba é composta, em percentagem média, por $58,04 \pm 4,49\%$ de celulose; $14,02 \pm 0,64\%$ de hemicelulose; $19,03 \pm 1,02\%$ de lignina; $7,53 \pm 0,63\%$ de umidade e $1,80 \pm 0,47\%$ de cinzas”.

A obtenção das fibras foi realizada com base no procedimento descrito por Santos (2015). O processo inicia-se com o corte das folhas secas em pedaços menores, como apresentado na Figura 21, o que facilita o manuseio e preparo do material para o processamento seguinte.

Figura 21 - Palha de carnaúba picada



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Em seguida, as folhas cortadas são submetidas à moagem em moinho de facas modelo SL-31, no Laboratório de Química Geral da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), campus Pau dos Ferros, conforme ilustrado na Figura 22, promovendo a redução do tamanho da palha e a obtenção de fibras em partículas menores.

Figura 22 - Processo de moagem da palha de carnaúba picada



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Na Figura 23, observa-se a diferença entre a palha fragmentada e o material após a moagem.

Figura 23 - Comparativo entre a granulometria da palha de carnaúba picada (à esquerda) e moída (à direita)



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Por fim, o material foi moído em um moinho de facas até se transformar em um pó fino e homogêneo, como mostra a Figura 24, facilitando a sua mistura no biopolímero.

Figura 24 - Palha de carnaúba moída e peneirada



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

4.1.3 Extração do amido de Batata Inglesa

O amido natural da batata inglesa foi obtido com base no método descrito por Queiroz Júnior (2018), com adaptações. Inicialmente, foram utilizados 447,15 g de batata inglesa, as quais foram descascadas, cortadas em pequenas partes (Figura 25). Em seguida, as batatas foram trituradas em liquidificador com a adição de 500 mL de água, facilitando a homogeneização da mistura (Figura 26).

Figura 25 - Batata cortada e descartada



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Figura 26 - Material após trituração em liquidificador

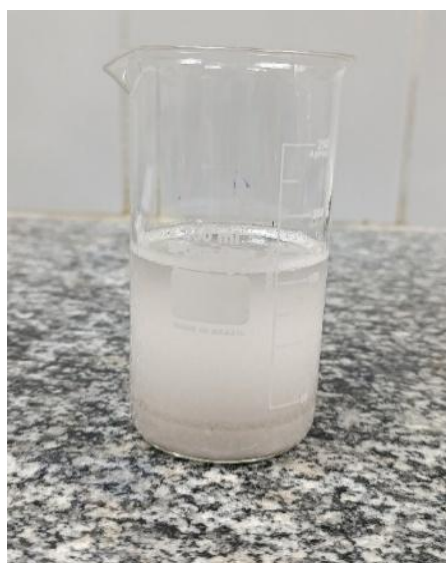


Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Após a trituração, o material foi filtrado, separando a fração líquida das partes sólidas. O resíduo sólido retido passou por três etapas de lavagem, utilizando-se 100 mL de água em cada lavagem, com o objetivo de extrair o máximo de amido residual.

O líquido obtido, incluindo as frações das lavagens, foi transferido para um recipiente e mantido em repouso por 24 horas, permitindo a sedimentação do amido no fundo (Figura 27). Após esse período, a água sobrenadante foi cuidadosamente removida, e o material branco depositado no fundo corresponde ao amido.

Figura 27 - Amido após o processo de lavagens



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

4.2 Processo de síntese do biopolímero

A produção dos filmes biodegradáveis foi realizada com base na metodologia descrita por Queiroz Júnior (2018), com adaptações. Para a obtenção dos filmes, foram preparadas seis formulações distintas, com uma massa total de 6g por amostra. A concentração de cera de carnaúba foi mantida constante em 60%. As variáveis do experimento consistiram nas concentrações de amido e fibra de carnaúba, visando observar a influência do reforço fibroso. Com o intuito de identificar a formulação de maior eficiência, testou-se o uso de amido comercial em comparação ao amido extraído da batata. As composições detalhadas de cada formulação estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Formulações dos filmes biopoliméricos

Formulação	Amido (%)	Fibra (%)	Cera (%)
BCFAN35	35	5	60
BCFAN30	30	10	60
BCFAN25	25	15	60
BCFAC35	35	5	60
BCFAC30	30	10	60
BCFAC25	25	15	60

Fonte: Adaptado de Queiroz Júnior (2018)

O procedimento experimental iniciou-se com a fusão da cera de carnaúba em um béquer sob agitação magnética e aquecimento, respeitando sua faixa de fusão característica entre 80 °C e 86 °C. Após o derretimento completo, adicionou-se 10 ml de água sob agitação constante até a homogeneização da emulsão. Na sequência, a fibra de carnaúba foi incorporada lentamente, evitando aglomerações.

Simultaneamente, em recipiente separado, preparou-se uma solução de amido com 10 ml de água destilada, e adicionado a mistura. Após a mistura final a solução foi submetida a agitação constante por 10 minutos sob aquecimento para promover a gelatinização do amido. As soluções foram vertidas em placas de Petri. Os filmes foram submetidos à secagem natural por um período de 7 dias.

Figura 28 - Representação esquemática do processo de produção



Fonte: Adaptado de ChatGPT (OpenAI, 2026).

4.3 Caracterização do biopolímero

Após o período de secagem, observou-se a formação dos biofilmes, os quais foram para a etapa de caracterização de cor, aspecto visual, permeabilidade e combustão

4.3.1 Cor e Aspecto

Usou-se a observação visual para avaliar a cor e o aspecto dos filmes. Com isso, foi possível verificar as tonalidades alcançadas e analisar detalhes práticos como a consistência e a espessura de cada amostra.

4.3.2 Combustão

Para realizar o ensaio de combustão, adaptou-se o procedimento de Queiroz Júnior (2018). Cortou-se um fragmento do filme, pesando-o antes e depois do teste. Durante o experimento, foram analisados e registrados o peso final, as mudanças visuais no filme, a cor da chama e o odor gerado pela queima.

4.3.3 Permeabilidade

Para analisar a permeabilidade, adaptou-se o procedimento sugerido por Queiroz Júnior (2018). O experimento prático consistiu em cortar um fragmento do filme, pingar uma gota de água sobre a sua superfície e acompanhar a reação do material e o seu contato com o líquido ao longo de 5 minutos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sínteses de biopolímero à base de amido natural

Após o período de secagem, os três biopolímeros formulados com 35%, 30% e 25% de amido natural e fibra da carnaúba foram avaliados quanto aos seus aspectos visuais e estruturais.

A formulação contendo 35% de amido e 5% de fibra da carnaúba (BCFAN35) apresentou coloração marrom-clara e superfície relativamente homogênea (Figura 29). Observou-se boa formação da matriz polimérica, com menor quantidade de partículas fibrosas visíveis, o que indica que a maior concentração de amido nesta formulação foi eficiente para promover a gelatinização completa e unir todos os componentes de maneira coesa. Apesar da boa integração estrutural, o material exibiu um aspecto pastoso ao término do período de secagem, manifestando limitações na rigidez estrutural e mantendo uma consistência semissólida.

Figura 29 - Biopolímero BCFAN35 após 7 dias



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O biopolímero produzido com 30% de amido e 10% de fibra (BCFAN30) apresentou coloração intermediária, a formação de grumos de amido dispersos e uma película fina superficial sobreposta a um volume de água localizado na região inferior do recipiente (Figura 30). Esse comportamento evidencia uma segregação de fases durante o processo de cura. A presença desses grumos e o acúmulo de líquido livre indicam um desequilíbrio na formulação, caracterizado pelo excesso de água e por uma quantidade insuficiente de amido para promover a completa gelatinização do sistema, o que impediu a união coesa e a incorporação efetiva de todos os componentes.

Figura 30 - Biopolímero BCFAN30 após 7 dias



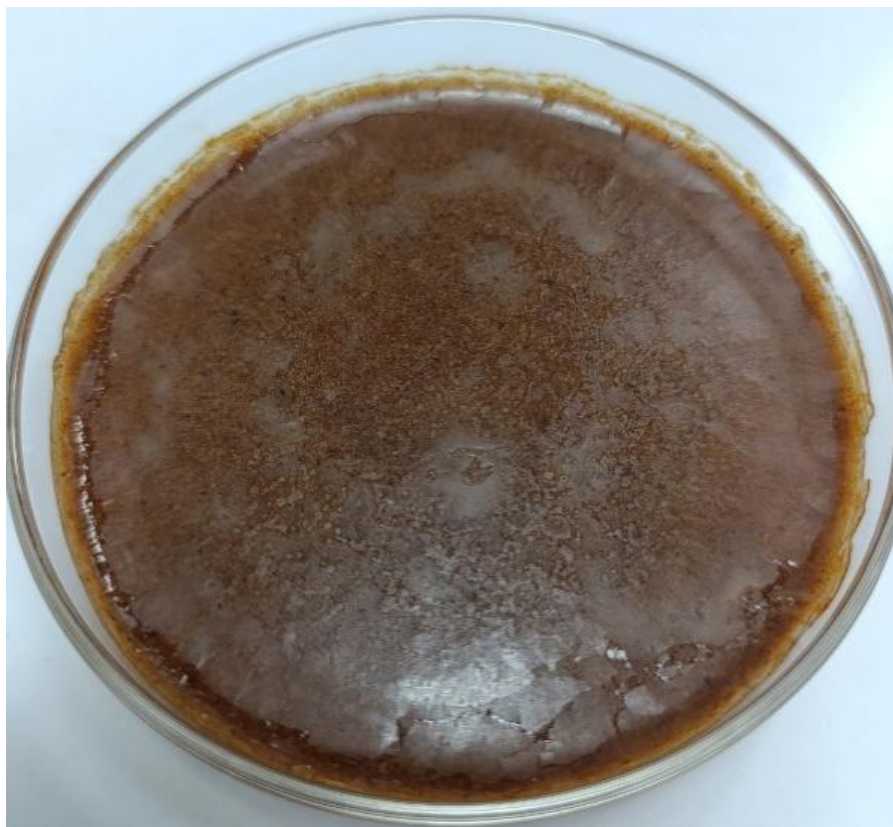
Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A formulação contendo 25% de amido e 15% de fibra da carnaúba, denominada BCFAN25, apresentou coloração mais escura devido à maior concentração de fibras de carnaúba (Figura 31). Verificou-se maior quantidade de partículas distribuídas na matriz e aspecto visual mais heterogêneo, caracterizado pelo surgimento de uma fina película em sua superfície e pelo acúmulo de um volume de água logo abaixo desta camada.

Este cenário confirma que a redução ainda maior no teor de amido (para 25%) intensificou a falta de matriz polimérica necessária para gelificar o meio, tornando o sistema

incapaz de reter a água livre e de aglutinar o elevado volume de fibras insolúveis adicionadas (15%).

Figura 31 - Biopolímero BCFAN25 após 7 dias



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A maior integridade estrutural observada no BCFAN35 pode estar associada à maior proporção de amido na matriz polimérica, o que favoreceu a formação de uma rede tridimensional contínua e estável após o processo de gelatinização, permitindo maior retenção da água no interior da estrutura gelificada.

Em contrapartida, a redução do teor de amido nas formulações BCFAN30 e BCFAN25 comprometeu a formação da estrutura gelificada, reduzindo a coesão da matriz polimérica. Como a quantidade de amido era pequena em relação ao volume de solvente utilizado, a gelatinização não ocorreu de forma completa, o que pode ser observado pelos grumos presentes no BCFAN30. Esse processo fez com que a água livre se acumulasse nas interfaces, provocando a separação de fases observada em ambos os sistemas, com acúmulo de líquido abaixo da película superficial.

5.2 Sínteses de biopolímero à base de amido comercial

De maneira análoga, após o período de secagem, os três biopolímeros formulados com 35%, 30% e 25% de amido comercial e fibra da carnaúba foram avaliados quanto aos seus aspectos visuais e estruturais.

A formulação contendo 35% de amido e 5% de fibra da carnaúba (BCFAC35) apresentou coloração marrom-clara e superfície brilhante (Figura 32). A amostra formou um biofilme contínuo, com as fibras distribuídas de maneira uniforme na matriz, indicando boa incorporação do reforço lignocelulósico.

A maior concentração de amido favoreceu o desenvolvimento de uma matriz mais coesa, reduzindo a presença de partículas visíveis na superfície. No entanto, mesmo após a secagem, o material permaneceu com aspecto pastoso e consistência semissólida, sugerindo que a estrutura formada ainda não apresentava rigidez suficiente para originar um filme totalmente consolidado.

Figura 32 - Biopolímero BCFAC35 após 7 dias



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

O biopolímero produzido com 30% de amido comercial e 10% de fibra da carnaúba (BCFAC30) apresentou coloração marrom e superfície contínua (Figura 33). As fibras de carnaúba permaneceram visíveis e distribuídas ao longo da matriz polimérica, indicando sua incorporação ao material. Entretanto, após o período de secagem, o biofilme manteve o aspecto pastoso e consistência semissólida, evidenciando que a estrutura formada não adquiriu rigidez suficiente para originar um filme completamente consolidado. Esse comportamento sugere que a redução do teor de amido diminuiu a capacidade de formação de uma rede polimérica resistente, comprometendo a estabilidade mecânica e dificultando o manuseio da amostra.

Figura 33 - Biopolímero BCFAC30 após 7 dias

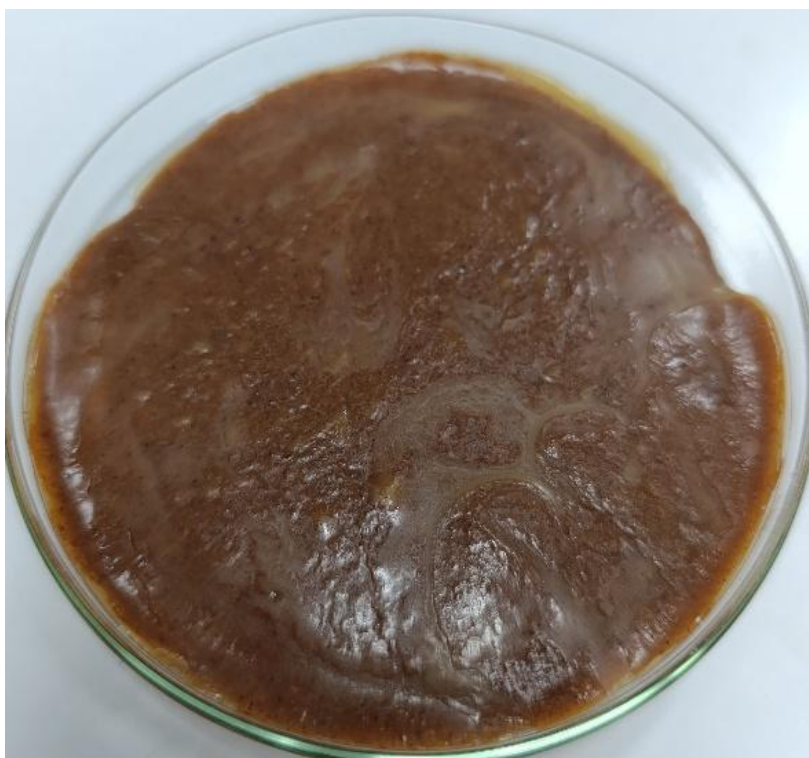


Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A formulação contendo 25% de amido comercial e 15% de fibra da carnaúba (BCFAC25) apresentou coloração marrom mais intensa e superfície brilhante (Figura 34). Observou-se a presença de grumos distribuídos na matriz polimérica, além das fibras de carnaúba visíveis, evidenciando que a incorporação dos componentes ocorreu de forma heterogênea.

A formação dos grumos sugere que a redução do teor de amido, associada ao aumento da quantidade de fibras, comprometeu a homogeneização da mistura, possivelmente devido à competição por água entre a fibra e o amido, dificultando a completa gelatinização deste último. Após a secagem, o material manteve aspecto pastoso, baixa resistência à deformação e dificuldade de manuseio, limitando a consolidação estrutural do biofilme.

Figura 34 - Biopolímero BCFAC25 após 7 dias



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A análise visual e da consistência dos biofilmes demonstrou que as formulações contendo 35% de amido apresentaram a melhor integridade estrutural, maior uniformidade superficial e o maior potencial de consolidação polimérica quando comparadas às demais proporções. Apesar da limitação quanto à rigidez final, estas amostras exibiram as características morfológicas mais promissoras.

Em razão desse desempenho superior, as amostras BCFAN35 e BCFAC35 foram selecionadas para a etapa seguinte de caracterização, na qual foram submetidas aos ensaios de combustão e permeabilidade.

5.3 Comportamento dos biopolímeros sob combustão

Durante o ensaio de combustão, observou-se que a queima das amostras BCFAN35 e BCFAC35 foi acompanhada pela liberação de gases escuros e um odor pungente característico, semelhante ao da pirólise de materiais celulósicos. Esse fenômeno está diretamente associado à decomposição térmica das ligações glicosídicas que constituem tanto as cadeias de amido quanto as fibras lignocelulósicas da carnaúba.

Para a avaliação quantitativa deste ensaio, os parâmetros de massa inicial, tempo de queima e massa final foram tabulados e convertidos em médias comparativas.

Tabela 3 - Dados obtidos com a combustão

Formulação	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Tempo de queima (s)
BCFAN35	1,2972g	1,1899g	25s
BCFAC35	1,0190g	0,9304g	20s

Fonte: Autoria própria (2026).

No resultado, a amostra comercial (BCFAC35) perdeu cerca de 8,69% da massa total. Já a amostra feita com amido natural (BCFAN35) teve uma perda um pouco menor, de 8,27%. Isso mostra que ambas têm alto potencial de degradação térmica e apresentam comportamento ambiental muito parecido.

5.4 Permeabilidade em água

Durante o ensaio de permeabilidade, verificou-se que a amostra produzida com amido natural (BCFAN35) apresentou capacidade inicial de retenção da gota de água em sua superfície (Figura 35). Entretanto, ao longo do tempo de exposição, o fluido foi gradualmente absorvido pela matriz polimérica. Após 5 minutos, a água havia atravessado completamente a amostra, atingindo o fundo da placa de Petri, o que evidencia uma menor resistência à permeação do fluido (Figura 36).

Figura 35 - Aplicação de água (BCFAN35)



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Figura 36 - Após 5 minutos (BCFAN35)



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Por outro lado, a amostra produzida com amido comercial (BCFAC35) apresentou absorção mais rápida da gota de água logo após sua aplicação. Contudo, diferentemente da formulação de amido natural, o fluido permaneceu retido no interior da matriz polimérica, sem atravessar completamente o material durante o período avaliado (Figura 37). Após 5 minutos de ensaio, a amostra manteve sua integridade estrutural e atuou como uma barreira mais eficiente à passagem da água (Figura 38).

Figura 37 - Aplicação de água (BCFAC35)



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Figura 38 - Após 5 minutos (BCFAC35)



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Esta diferença de comportamento deve-se ao facto de o amido comercial ser mais puro, homogéneo e apresentar uma estrutura molecular mais compacta. Este amido gera uma rede em gel densa e coesa, o que dificulta significativamente a circulação da água no seu interior.

Assim, embora a hidrofiliabilidade (afinidade com a água) do amido comercial provoque uma absorção inicial rápida, a alta densidade da matriz retém o fluido através de fortes ligações de hidrogénio. Como a formulação não possui um agente plastificante (como o glicerol) para conferir flexibilidade, a rigidez das cadeias do amido comercial imobilizou a água retida. Isto impediu a formação de canais de escoamento total através do biofilme, ao contrário do comportamento observado na formulação com amido natural.

5.5 Análise comparativa com a literatura

A análise do comportamento dos biopolímeros desenvolvidos neste estudo pode ser enriquecida pelo confronto com a literatura científica, correlacionando as variáveis estruturais observadas com os mecanismos e comportamentos descritos por outros autores. No que se refere à influência da concentração de amido, a proporção de 35% mostrou-se a condição mais

favorável entre as formulações testadas para a obtenção de uma matriz visualmente contínua. Quando essa concentração foi reduzida para 30% e 25%, observou-se segregação de fases e formação de grumos, indicando que a menor quantidade de amido pode ter limitado a retenção da água livre e a aglutinação dos demais componentes durante o processo de cura.

Esse comportamento mostra-se condizente com as discussões de Xavier et al. (2020), Gomes (2019) e Gonçalves (2018), que identificam o amido como o componente estrutural principal da matriz; quando a quantidade de amido se torna insuficiente para promover uma gelatinização eficiente, a formação da rede tridimensional pode ser comprometida, prejudicando a homogeneidade macroscópica do material.

Essa variação estrutural coincidiu com o aumento do teor de fibras na formulação. Enquanto a inserção de 5% de fibra de carnaúba resultou em uma distribuição visualmente mais uniforme, a elevação para teores de 10% e 15% associou-se ao surgimento de grumos e à heterogeneidade. Na literatura sobre biocompósitos, Gomes (2019) e Gonçalves (2018) apontam que fibras lignocelulósicas possuem caráter hidrofílico devido à presença de grupos hidroxila, o que influencia a dinâmica de água no sistema.

Conforme sugerido por esses autores, teores elevados de carga podem favorecer interações fibra-fibra em detrimento da interação fibra-matriz, propiciando a formação de aglomerados. Além disso, Carvalho (2011) discute que o uso de fibras vegetais sem tratamento químico prévio pode limitar a adesão interfacial com a matriz polimérica, uma consideração que auxilia na compreensão da heterogeneidade observada nas formulações com maior teor de fibras deste estudo.

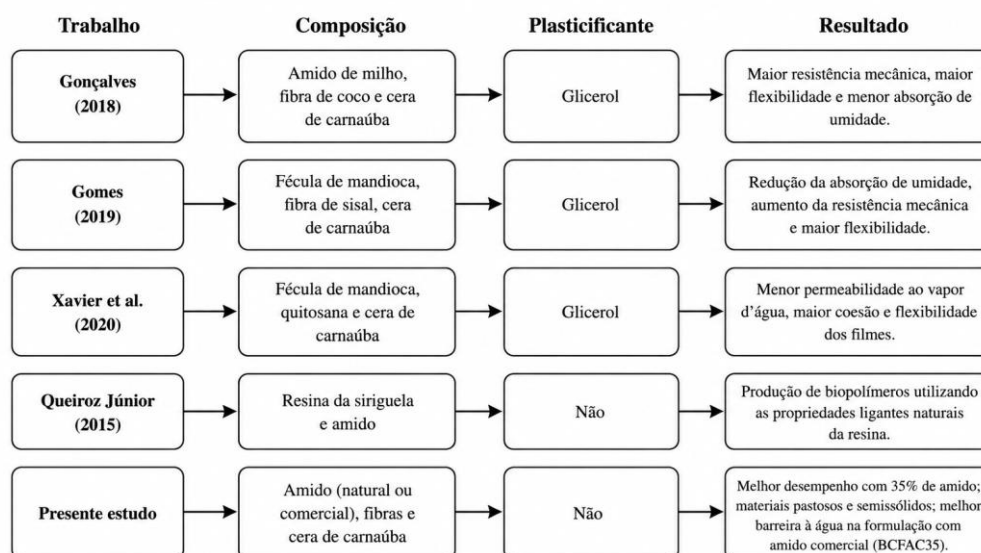
A ausência de um agente plastificante na formulação também se refletiu nas características físicas dos materiais obtidos, os quais mantiveram uma consistência pastosa ou semissólida após o período de secagem. Esse perfil difere do comportamento típico de filmes biopoliméricos flexíveis descritos na literatura, como no trabalho de Xavier et al. (2020), no qual a incorporação de glicerol é empregada para reduzir as forças intermoleculares e conferir elasticidade ao material.

Sob a perspectiva das propriedades de barreira, a não utilização de plastificantes pode estar associada ao comportamento observado no ensaio de permeabilidade com o amido comercial (BCFAC35), no qual a água foi retida sem transpassar a amostra após cinco minutos. Esse comportamento é consistente com as discussões apresentadas por Gomes (2019) e Xavier et al. (2020), que destacam que a presença de plastificantes aumenta a mobilidade das cadeias poliméricas, podendo influenciar as propriedades de barreira dos materiais.

Por fim, a cera de carnaúba atuou como um importante componente para contrapor a hidrofiliabilidade inerente ao amido e às fibras vegetais. Utilizada na proporção de 60% nas formulações avaliadas, a inclusão desse componente lipídico associou-se ao comportamento de barreira à água observado durante o ensaio de permeabilidade.

Esse papel de barreira encontra amparo nas pesquisas de Xavier et al. (2020), Gomes (2019) e Gonçalves (2018), que descrevem a capacidade dos constituintes da cera de carnaúba em dificultar a difusão de moléculas de água através da blenda polimérica, criando caminhos mais tortuosos para o escoamento do fluido. Dessa forma, as características observadas na formulação BCFAN35 mostraram-se consistentes com as tendências descritas na literatura, reforçando a relevância da incorporação de componentes hidrofóbicos no desenvolvimento de materiais de base amilácea.

Figura 39 - Comparativo de formulações e resultados frente à literatura.



Fonte: Adaptado de ChatGPT (OpenAI, 2026).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das amostras preparadas confirmou o potencial promissor da combinação entre amido, cera e fibras de carnaúba para o desenvolvimento de biopolímeros. Dentre as formulações testadas, a BCFAN35 e a BCFAC35 (compostas por 60% de cera, 35% de amido e 5% de fibra) se destacaram pela superioridade em estabilidade, integridade estrutural e homogeneidade. Entre ambas, a BCFAN35 obteve o desempenho mais satisfatório.

Constatou-se que a variação na composição das fórmulas afetou diretamente o desempenho dos biopolímeros, com os melhores índices associados a uma maior proporção de amido e menor quantidade de fibras. Nos ensaios de combustão, a amostra BCFAN35 revelou superioridade em estabilidade estrutural. Adicionalmente, as análises de permeabilidade confirmaram que a cera de carnaúba foi essencial para diminuir a absorção de umidade e otimizar a capacidade de barreira do material.

Com base nesses achados, a formulação BCFAN35 se consolida como a de maior viabilidade para aplicações práticas, destacando-se como o modelo que mais se assemelha aos filmes poliméricos de origem celulósica. O uso de insumos renováveis também valida o apelo ecológico do projeto. Para pesquisas subsequentes, sugere-se a adição de plastificantes (como o glicerol) e a execução de testes mecânicos, térmicos, microscópicos e de biodegradação, com o intuito de aprofundar a caracterização e o refino do biopolímero.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Lúcia Betânia da Silva et al. Antioxidant and antifungal activity of carnauba wax powder extracts. **Industrial Crops & Products**, v. 125, p. 220-227, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.09.004>. Acesso em: 30 mar. 2026.

ASSOCIAÇÃO CAATINGA. **Manual de boas práticas na cadeia produtiva da carnaúba**. Fortaleza: Associação Caatinga, 2013. Disponível em: https://www.acaatinga.org.br/wp-content/uploads/manual_cadeia_produtiva_da_carnauba.pdf. Acesso em: 25 maio 2025.

BURMESTER, Cristiane Lourencetti. **Ciências do ambiente e sustentabilidade**. Curitiba: Contentus, 2020. 95 p.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.

CARNEIRO DA SILVA, Lucas Rafael; SOUSA CAMPELO, Themistocles de. Tendências atuais sobre a incorporação de fibras vegetais em matrizes poliméricas: influência nas propriedades mecânicas. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 22, n. 4, p. 165-179, jul. 2021. Disponível em: <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-22-4-165-179.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2026.

CARVALHO, Luiz Fernando Meneses. **Tratamentos de fibras de carnaúba [Copernicia prunifera (Miller) H. E. Moore] para o desenvolvimento de compósito biodegradável com matriz de polihidroxibutirato**. 2011. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12780>. Acesso em: 23 mar. 2026.

CHANDRA ASRI. **What Is Polymerization? Types, Mechanism, and Examples**. Disponível em: <https://chandra-asri.com/en/blog/what-is-polymerization>. Acesso em: 18 ago. 2025.

DINIS, Calton João. **Produção de biocarvão a partir de resíduos de casca de banana e melancia: um estudo sobre carbonização hidrotérmica e pirólise assistida por micro-ondas**. 2025. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.75>. Acesso em: 20 mar. 2026.

DOROSKEVICH, Stefany. **Determinação das etapas de degradação térmica utilizando modelos cinéticos em diferentes fibras vegetais**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022. Disponível em: <http://dspace.unila.edu.br/123456789/6786>. Acesso em: 25 maio 2025.

ECYCLE. **Bioplástico: conheça tipos e aplicações**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/bioplastico/>. Acesso em: 18 ago. 2025.

ECYCLE. **Saiba o que são biopolímeros e suas vantagens**. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/biopolimeros/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **What are bioplastics?** Disponível em: <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>. Acesso em: 17 maio 2025.

EUROPLAS. **What are some of the advantages and disadvantages of bioplastics.** Disponível em: <https://europlas.com.vn/en-US/blog-1/what-are-some-of-the-advantages-and-disadvantages-of-bioplastics>. Acesso em: 19 ago. 2025.

FOREZI, Luana da S. M. et al. Aqui tem Química: Parte V. Ceras Naturais. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 5, 2022. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/4337>. Acesso em: 6 jun. 2026.

FREITAS, M. M. M. **Obtenção de álcoois de cadeia longa a partir da cera de carnaúba.** 68 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/15888>. Acesso em: 20 jun. 2025.

GOMES, Áleft Verlanger Rocha. **Obtenção e caracterização de biocompósitos de fécula de mandioca, fibra de sisal e cera de carnaúba.** 2019. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/5420>. Acesso em: 18 mar. 2026.

GONÇALVES, Francielle Cristine Pereira. **Análise da influência da fibra de coco e cera de carnaúba em um biocompósito com matriz de amido de milho.** 2018. 46 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/5120>. Acesso em: 25 maio 2026.

JONES, Frances. A promessa dos bioplásticos. **Revista Pesquisa FAPESP**, ed. 290, abr. 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-promessa-dos-bioplasticos/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

JUSTINO, Heloisa de Fátima Mendes et al. Principais biopolímeros derivados de subprodutos alimentares: uma breve revisão. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 8, p. 14711-01e, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.18540/jcecvl8iss7pp14711-01e>. Acesso em: 17 ago. 2025.

KUCHTA, David M. **What Are Bioplastics? Overview and Impacts.** Treehugger, 21 dez. 2022. Disponível em: <https://www.treehugger.com/what-are-bioplastics-6829398>. Acesso em: 19 ago. 2025.

MATHEUS, Ricardo et al. Impacto das embalagens plásticas e dos bioplásticos na gestão dos resíduos sólidos. **Revista Aracê, São José dos Pinhais**, v. 7, n. 4, p. 18226-18237, 2025. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/4425>. Acesso em: 28 maio 2025.

MATOS, Vanderson Eney de et al. Investigação industrial sobre o desempenho comparativo entre amidos de milho e mandioca como depressores de ferro na flotação catiônica reversa. In: SIMPÓSIO DE MINERAÇÃO, 22., 2023, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABM Week, 2023. p. 530-539. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/pt-br/article/investigao-industrial-sobre-o-desempenho-comparativo-entre-amidos-de-milho-e-mandioca-como-depressores-de-ferro-na-flotao-catinica-reversa>. Acesso em: 20 mar. 2026.

MELO, Luiz Flávio Luciano de. **Madeira plástica de carnaúba (Copernicia prunifera), produzida com resinas de polipropileno e polietileno – processo, produto e características**. 2021. 97 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/61535>. Acesso em: 26 maio 2025.

NATARELLI, Caio Vinicius Lima et al. **Introdução aos Materiais Poliméricos**. In: NATARELLI, Caio Vinicius Lima et al. Nanotecnologia aplicada a polímeros. São Paulo: Blucher, 2022. p. 49-90. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/9786555502527-02>. Acesso em: 20 mar. 2025.

OPENAI. ChatGPT (GPT-5.5). San Francisco: OpenAI, 2026. Disponível em: <https://chat.openai.com>. Acesso em: 1 jun. 2026.

PASHOVA, Sabka. Application of Plant Waxes in Edible Coatings. **Coatings**, v. 13, n. 5, p. 911, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings13050911>. Acesso em: 12 jun. 2026.

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió: EDUFAL, 2005.

PINHO, Mayara Pereira. **Avaliação do controle de qualidade da cera de carnaúba**. 2021. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/66579>. Acesso em: 30 mar. 2026.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Com foco em soluções para a poluição plástica, Dia Mundial do Meio Ambiente 2023 será sediado pela República de Côte d'Ivoire**. Nairobi/Abidjan, 2 fev. 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/com-foco-em-solucoes-para-poluicao-plastica-dia>. Acesso em: 17 maio 2025.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **From pollution to solution: a global assessment of marine litter and plastic pollution**. Nairobi: UNEP, 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>. Acesso em: 22 maio 2025.

QUEIROZ JÚNIOR, Francisco Carlos de. **Produção de biopolímero utilizando resina da ciriguela (Spondias purpurea)**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/6055>. Acesso em: 20 maio 2025.

RIBEIRO, Aline Kelly Carvalho. **Monitoramento do controle de qualidade da cera de carnaúba na indústria Agrocera – Russas/CE**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/12234>. Acesso em: 30 mar. 2026.

SANTOS, Lucas Leite dos. **Métodos de produção de biopolímeros de matérias-primas vegetais: uma revisão da literatura**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) – Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/7768>. Acesso em: 18 maio 2025.

SANTOS, Luiza Maria Pinheiro dos. **Desenvolvimento e caracterização de biocompósito de látex (borracha natural) e fibra de carnaúba**. 2015. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/20931>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SARAIVA, Tailton Telles da Silva. **Produção de biopolímero utilizando glicerol proveniente de biodiesel de babosa**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) – Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/11542>. Acesso em: 26 maio 2025.

SILVA, Adriana Carvalho Sousa e. **Conservação pós-colheita de mangas pelo uso de revestimentos à base de pectina e carboximetilcelulose associados a ceras vegetais**. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Rio Verde, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/3860>. Acesso em: 7 jun. 2026.

SILVA, Aline da Costa. Classificação metodológica das pesquisas científicas. **Anais do Congresso Nacional de Pesquisas e Práticas em Educação**, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2024. Disponível em: <https://revistas.ceeinter.com.br/anaisconpepe/article/view/1452>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SILVA, Elane Bezerra da et al. Current Knowledge of Carnauba Plant (*Copernicia prunifera*): Current Stage, Trends, and Future Perspectives. **Environments**, v. 12, n. 11, p. 437, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3298/12/11/437>. Acesso em: 6 jun. 2026.

SOLDERA, Bruna. **O que são bioplásticos?**. Água Sustentável, 2 dez. 2022. Disponível em: <https://www.aguasustentavel.org.br/conteudo/blog/204-o-que-sao-bioplasticos>. Acesso em: 18 ago. 2025.

SOUZA, Paola de. **Tratamentos de fibras de carnaúba para o desenvolvimento de compósito biodegradável com matriz de polihidroxibutirato**. 2025. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2025. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/292291>. Acesso em: 7 jun. 2026.

SOUZA, Ricardo Fernandes de. **Obtenção, caracterização e aplicação de um compósito de matriz de poliéster e carga de pó de carnaúba**. 2020. 70 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/31937>. Acesso em: 29 maio 2025.

VIRGINIO, Itamira Raquel Santos. **O efeito adição da fibra da folha da carnaúba (Copernicia prunifera) como reforço em argamassas de revestimento**. 2023. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/handle/177683/5297>. Acesso em: 30 mar. 2026.

XAVIER, Tálisson Davi Noberto et al. Filmes biopoliméricos baseados em fécula, quitosana e cera de carnaúba e suas propriedades. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 4, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347823292_Filmes_biopolimericos_baseados_em_fecula_quitosana_e_cera_de_carnauba_e_suas_propriedades. Acesso em: 25 maio 2025.