

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA

ANE CRISTINE ROSA PINTO

Bioplásticos e compósitos à base de amido para embalagens alimentícias de uso único:
propriedades, limitações e desafios ambientais

Uberlândia – MG

2026

ANE CRISTINE ROSA PINTO

Bioplásticos e compósitos à base de amido para embalagens alimentícias de uso único:
propriedades, limitações e desafios ambientais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Química da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em Química
Industrial.

Orientador: Profa. Dra. Elaine Kikuti

Uberlândia - MG

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

P659 Pinto, Ane Cristine Rosa, 2003-
2026 Bioplásticos e compósitos à base de amido para embalagens alimentícias de uso único [recurso eletrônico] : propriedades, limitações e desafios ambientais / Ane Cristine Rosa Pinto. - 2026.

Orientador: Elaine Kikuti.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Química Industrial.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Tecnologia química. I. Kikuti, Elaine, 1976-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Química Industrial. III. Título.

CDU: 660.2

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ANE CRISTINE ROSA PINTO

Bioplásticos e compósitos à base de amido para embalagens alimentícias de uso único:
propriedades, limitações e desafios ambientais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Química da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do título de bacharel em Química
Industrial.

Uberlândia, 11 de março de 2026

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Elaine Kikuti (IQUFU/UFU)

Profa. Dra. Rosana Maria Nascimento de Assunção (ICENP/UFU)

Dr. Marcos Vinícius Ferreira (IQUFU/UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Tereza e Geraldo, por todo o apoio e suporte ao longo de todos esses anos de graduação. Vocês me criaram para ser a melhor versão de mim; todas as minhas qualidades adquiridas vêm do vosso amor, carinho, humildade e bondade. Agradeço por serem as pessoas que me mostraram, desde a infância, que a educação é o caminho e o poder que ela tem de transformar vidas. Acredito que, sem vocês, não seria hoje metade do que eu sou.

Agradeço ao meu namorado e amigo, Álvaro, por estar sempre presente não somente nos momentos alegres, mas, principalmente, nos momentos difíceis, em que um ombro amigo era necessário. Obrigada por ser a pessoa a escutar milhares de vezes as minhas explicações de seminários e palestras, me dando dicas, sugestões e me acalmando quando era necessário. Agradeço por você estar caminhando comigo nessa jornada tão longa, incerta e bonita que é a vida.

Agradeço também a todas as amigas que conquistei ao longo da faculdade: Laura, Giulia, Rafaela, Nicolý, Késia, Isabella e Rafael. Vocês possibilitaram que esses anos de graduação fossem mais iluminados, quentes e felizes. Agradeço, em especial, à Laura e à sua família por serem meu suporte em uma cidade onde não conhecia ninguém. O acolhimento de vocês me deu as forças necessárias para continuar perseguindo o meu caminho.

Agradeço aos meus companheiros do projeto de extensão Gastronomia Molecular por tornarem meus dias de graduação tão divertidos. Esse projeto é e sempre será muito importante para mim. É com ele em mente que irei lembrar que, com força de vontade, trabalho voluntário, amigas e apoio, ideias sempre podem sair do papel e que a divulgação científica é um trabalho tão nobre e essencial na sociedade atualmente. As ciências, em especial a química, estão presentes em todas as partes do nosso cotidiano, e entendê-las nos torna mais capazes de conceber e modificar a realidade ao nosso redor.

Gostaria de agradecer também a todos os professores do Instituto de Química da UFU que fizeram parte da minha jornada acadêmica. Os conhecimentos repassados foram essenciais para a minha formação acadêmica e profissional. Por fim, gostaria de agradecer especialmente à professora Elaine Kikuti, por me acolher desde o primeiro semestre da faculdade e me integrar aos seus projetos de extensão e pesquisa. Me senti feliz e imensamente realizada por poder contribuir em todos os seus projetos. Você, além de uma ótima orientadora e professora, foi sobretudo uma ótima amiga.

RESUMO

A ampla utilização de plásticos no cotidiano, aliada à cultura do descarte, tem resultado na geração de grandes volumes de resíduos em curtos períodos. O setor de embalagens alimentícias é responsável pelo consumo de aproximadamente 40% do plástico produzido globalmente, predominando o uso de embalagens de uso único. Devido à contaminação pelo contato direto com alimentos, esses materiais apresentam limitações para reutilização e reciclagem, sendo majoritariamente destinados a aterros sanitários ou descartados no ambiente, com impactos significativos sobre ecossistemas terrestres e aquáticos. Como consequência, apenas cerca de 5% dessas embalagens são efetivamente recicladas e reintegradas à produção de novos materiais. Nesse contexto, a substituição de plásticos convencionais derivados do petróleo por embalagens biodegradáveis surge como uma estratégia promissora para mitigar tais impactos ambientais. O amido desperta particular interesse devido à sua abundância e renovabilidade, podendo apresentar comportamento termoplástico quando submetido à ação de plastificantes, umidade e temperatura, o que possibilita sua moldagem por técnicas convencionais utilizadas no processamento de polímeros. Esta revisão narrativa teve como objetivo sintetizar os avanços recentes na produção de bioplásticos e compósitos à base de amido, a partir de uma busca bibliográfica em bases de dados como Google Scholar, ScienceDirect e PubMed. Foram considerados artigos publicados entre 2008 e fevereiro de 2026, de modo a reunir e discutir as principais propriedades físico-químicas desses materiais, bem como suas limitações. De modo geral, bioplásticos e compósitos à base de amido possibilitam a obtenção de materiais mais sustentáveis, com menor pegada de carbono em comparação aos plásticos de origem fóssil. Estes destacam-se ainda pelo baixo custo e pela elevada biodegradabilidade em relação a outros biopolímeros, além do potencial de integração a modelos de economia circular por meio da compostagem ou da produção de biogás. Entretanto, limitações relacionadas às propriedades mecânicas e à elevada sensibilidade à água ainda restringem sua aplicação, sendo parcialmente superadas por estratégias como a incorporação de aditivos e a formação de blendas com outros polímeros biodegradáveis. Em síntese, os estudos analisados indicam que materiais à base de amido constituem uma alternativa promissora aos plásticos convencionais em aplicações de embalagens alimentícias descartáveis.

Palavras-chave: bioplásticos; biocompósitos; amido termoplástico; embalagens alimentícias; biodegradabilidade.

ABSTRACT

The widespread use of plastics in everyday life, combined with a culture of disposability, has resulted in the generation of large volumes of waste over short periods of time. The food packaging sector accounts for approximately 40% of global plastic consumption, with single-use packaging predominating. Due to contamination resulting from direct contact with food, these materials present limitations for reuse and recycling and are therefore predominantly disposed of in landfills or released into the environment, causing significant impacts on terrestrial and aquatic ecosystems. Consequently, only about 5% of these packages are effectively recycled and reintegrated into the production of new materials. In this context, replacing conventional petroleum-derived plastics with biodegradable packaging emerges as a promising strategy to mitigate such environmental impacts. Starch has attracted particular interest due to its abundance and renewability and can exhibit thermoplastic behavior when processed in the presence of plasticizers, moisture, and heat, which enables its shaping through conventional polymer processing techniques. This narrative review aimed to synthesize recent advances in the production of starch-based bioplastics and composites through a bibliographic search conducted in databases such as Google Scholar, ScienceDirect, and PubMed. Articles published between 2008 and February 2026 were considered in order to compile and discuss the main physicochemical properties of these materials, as well as their limitations. In general, starch-based bioplastics and composites enable the development of more sustainable materials with a lower carbon footprint compared to fossil-based plastics. These materials also stand out due to their low cost and high biodegradability relative to other biopolymers, as well as their potential integration into circular economy models through composting or biogas production. However, limitations related to mechanical properties and high sensitivity to water still restrict their application, although these drawbacks can be partially overcome through strategies such as the incorporation of additives and the formation of blends with other biodegradable polymers. In summary, the analyzed studies indicate that starch-based materials constitute a promising alternative to conventional plastics in disposable food packaging applications.

Keywords: bioplastics; biocomposites; thermoplastic starch; food packaging; biodegradability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão e aplicação dos bioplásticos.....	22
Figura 2 – Estrutura da (a) amilose e (b) amilopectina	24
Figura 3 – Efeito da adição de plastificantes nas interações intermoleculares entre as cadeias de amido	26
Figura 4 – Etapas da biodegradação	29
Figura 5 – Representação esquemática da distribuição de tensões em compósitos com cargas (a) homogeneamente dispersas e (b) mal dispersas.....	33
Figura 6 – Categorias e exemplos de nanocargas.....	34
Figura 7 – Efeito da tortuosidade nas propriedades de barreira de compósitos	35
Figura 8 – Bandejas feitas a partir de amido de mandioca e fibras de (a) ceiba, (b) café e (c) cacau a diferentes porcentagens	37
Figura 9 – Rotas para produção do PLA a partir do ácido láctico	39
Figura 10 – Síntese do PBAT	41
Figura 11 – Produção de blendas de PBAT/TPS com o iniciador BIBP e o agente de reticulação TAIC	42
Figura 12 – Representação da estrutura da policaprolactona	43
Figura 13 – Compatibilização entre TPS e polímeros hidrofóbicos.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Biodegradabilidade de materiais à base de amido relatados na literatura	30
Tabela 2 – Potenciais aplicações de materiais à base de amido na substituição de plásticos convencionais	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AgNPs	Nanopartículas de prata
ASTM	Sociedade Americana para Testes e Materiais
BIBP	Bis(1-(terc-butilperóxi)-1-metiletil)-benzeno
CEN	Comitê Europeu de Normalização
CuNPs	Nanopartículas de cobre
DPPH	2,2-difenil-1-picrilhidrazil
EPS	Poliestireno expandido
GQDs	Pontos quânticos de grafeno
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	Organização Internacional de Normalização
NS	Amido Nativo
PBAT	Poli(butileno adipato-co-tereftalato)
PBS	Succinato de polibutileno
PCL	Policaprolactona
PCR	Reciclagem pós-consumo
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Politereftalato de etileno
PHA	Polihidroxialcanoato
PLA	Ácido polilático
PLA-g-MA	Ácido polilático enxertado com anidrido maleico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVA	Álcool polivinílico
Si-Cu-NPs	Micropartículas de cobre revestidas com sílica
TAIC	1,3,5-tri-2-propenil-1,3,5-triazina-2,4,6(1H,3H,5H)-triona
T _g	Temperatura de transição vítrea
TPS	Amido termoplástico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	METODOLOGIA.....	16
3	EMBALAGENS PARA ALIMENTOS	17
3.1	Funções	17
3.2	Embalagens plásticas no Brasil	17
4	BIOPLÁSTICOS	21
5	AMIDO NATIVO E AMIDO TERMOPLÁSTICO	24
5.1	Propriedades químicas e físicas do amido	24
5.2	O amido termoplástico (TPS)	25
6	BIODEGRADABILIDADE E ECOTOXICIDADE.....	28
7	ADITIVOS NOS BIOPLÁSTICOS A BASE DE AMIDO	33
7.1	Cargas particuladas.....	33
7.2	Blendas e Compósitos com TPS.....	38
7.2.1	Blendas de TPS/PLA	39
7.2.2	Blendas de TPS/PBAT.....	41
7.2.3	Blendas de TPS/PCL	43
8	VANTAGENS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS.....	48
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
10	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O uso de plásticos derivados de fontes fósseis se difundiu amplamente na sociedade moderna devido às suas características, tais como baixo custo (1,0–2,0 US\$/kg), excelentes propriedades mecânicas, facilidade de processamento e vida útil prolongada. Esses materiais tornaram-se onipresentes em aplicações que vão desde embalagens para alimentos até as áreas médica e de transportes (Koller; Mukherjee, 2022; Williams; Rangel-Buitrago, 2022). Entre os setores que mais consomem esses materiais, destaca-se a indústria de embalagens alimentícias, uma vez que os plásticos apresentam elevada eficiência na proteção dos alimentos durante o armazenamento e o transporte (Hassoun *et al.*, 2023).

Em função dessa praticidade, os plásticos convencionais passaram por um processo de ampla difusão e intensificação de uso. No entanto, essa expansão, aliada ao seu caráter predominantemente descartável, resultou em um expressivo aumento na geração de resíduos sólidos (Hassoun *et al.*, 2023). Estima-se que, entre 1950 e 2017, aproximadamente 9,2 bilhões de toneladas de plásticos tenham sido produzidas globalmente, sendo cerca de metade destinada a aplicações de uso único (Williams; Rangel-Buitrago, 2022). Esses materiais descartáveis, sobretudo quando utilizados fora do ambiente doméstico e associados à cultura de “usar e descartar”, são frequentemente descartados no próprio local de consumo ou encaminhados para aterros sanitários, atingindo diretamente o meio ambiente em cenários mais críticos (Ncube *et al.*, 2021).

No Brasil, estima-se o descarte anual de aproximadamente 1,3 milhão de toneladas de resíduos plásticos nos oceanos, o que corresponde a cerca de 8% da poluição plástica global, associado a uma produção anual de aproximadamente 2,95 milhões de toneladas de plásticos de uso único (Oceana, 2024). Diante desse cenário, uma das iniciativas do Governo Federal foi a criação da Estratégia Nacional Oceano sem Plástico, instituída pelo Decreto nº 12.644, de 1º de outubro de 2025, a qual estabelece medidas voltadas à redução da poluição plástica no Brasil até 2030 (Brasil, 2025). Entre as ações previstas, destacam-se o incentivo ao uso de alternativas de embalagens mais sustentáveis e o financiamento de inovações tecnológicas destinadas à prevenção e ao combate da poluição plástica.

O setor de embalagens alimentícias demanda materiais leves, com boas propriedades mecânicas, a fim de reduzir custos tanto no processamento quanto no transporte. Nesse contexto, polímeros derivados do petróleo, como o polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno (PE) e politereftalato de etileno (PET), têm sido amplamente utilizados por

atenderem a esses requisitos. Como forma de mitigar a geração de resíduos, a reciclabilidade desses materiais tem sido incorporada como uma estratégia importante de gestão (Ncube *et al.*, 2021). Contudo, apenas o PET possui protocolos de reciclagem aprovados no Brasil para contato direto com alimentos (Brasil, 2016).

O processo de reciclagem pós-consumo (*post-consumer recycled*, PCR) do PET vem sendo otimizado há décadas. Desde 2008, o uso de garrafas de PET-PCR em embalagens alimentícias é aprovado, desde que submetido a processos de reciclagem do tipo *super-clean*, os quais são viabilizados pelas características químicas relativamente inertes desse polímero (Brasil, 2016; Welle, 2011). Outros polímeros empregados em embalagens alimentícias, como o PE e o PP, também podem ser reciclados; entretanto, seu reaproveitamento geralmente ocorre em aplicações de menor valor agregado, como caixas, recipientes ou produtos como escovas de dente (Ncube *et al.*, 2021). Apesar de contribuir para a redução do volume de resíduos plásticos, a reciclagem pós-consumo pode perpetuar um modelo de *downcycling*, no qual o valor e o desempenho do material diminuem progressivamente a cada ciclo de reaproveitamento.

Mesmo no caso do PET-PCR, estima-se que sua reciclagem ocorra por apenas dois a três ciclos antes que a degradação de suas propriedades se torne significativa, limitando sua reciclagem subsequente (Yang *et al.*, 2026). Nesse sentido, a reciclagem deve ser compreendida como parte de um conjunto mais amplo de estratégias de gestão de resíduos, em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, que prioriza a não geração, a redução e a destinação ambientalmente adequadas dos resíduos.

Após o uso em embalagens, os resíduos plásticos são descartados e podem ser encaminhados para usinas de reciclagem, unidades de incineração ou aterros sanitários, ou ainda acabar no meio ambiente, onde persistem por séculos, especialmente nos dois últimos destinos (Ncube *et al.*, 2021). Considerando que o modelo atual de produção e consumo é fortemente baseado em plásticos fósseis de uso único e que, globalmente, apenas cerca de 5% desses materiais são efetivamente reciclados e transformados em novos produtos, torna-se imprescindível direcionar a análise para o fim de vida útil desses materiais (Ncube *et al.*, 2021).

Plásticos convencionais podem persistir no meio ambiente por séculos. Embora esses materiais sejam suscetíveis a diferentes processos de degradação ambiental, como exposição à radiação solar, cisalhamento mecânico e oxidação térmica, tais processos geralmente não resultam em sua completa mineralização. Em vez disso, levam à fragmentação do material, originando partículas cada vez menores. Esses fragmentos, conhecidos como microplásticos (partículas com tamanho inferior a 5 mm), podem permanecer por longos períodos em

ecossistemas terrestres e marinhos (Tirkey; Upadhyay, 2021). Devido à sua ampla dispersão no ambiente, esses contaminantes acabam sendo incorporados à cadeia alimentar e podem atingir o organismo humano por meio do consumo de alimentos e bebidas. Estima-se que um indivíduo ingira aproximadamente 50.000 partículas de microplásticos por ano, o que levanta preocupações quanto aos potenciais efeitos adversos à saúde humana a longo prazo (Williams; Rangel-Buitrago, 2022).

Nesse contexto, o uso de materiais de origem renovável e/ou biodegradáveis, denominados bioplásticos, tem ampliado as possibilidades de aplicação em embalagens alimentícias de uso único (Abe *et al.*, 2021; Luchese; Rodrigues; Tessaro, 2021; Parveen *et al.*, 2024). Os plásticos biodegradáveis de base biológica oferecem rotas alternativas de destinação ao final de sua vida útil, especialmente em aplicações de curta duração. Entre essas rotas destacam-se a digestão anaeróbia, utilizada para a produção de biogás, e a compostagem industrial, que permite a conversão do material em composto orgânico. Dessa forma, esses materiais contribuem para o fechamento de ciclos de materiais dentro de uma economia circular, cujo objetivo é maximizar o aproveitamento de recursos e minimizar a geração de resíduos (Di Bartolo; Infurna; Dintcheva, 2021).

Dentre as alternativas de base biológica para o uso em embalagens, o amido destaca-se por ser um polissacarídeo de origem vegetal amplamente disponível, que pode ser produzido em grandes quantidades a baixo custo (Shafqat *et al.*, 2020). Os bioplásticos à base de amido enquadram-se na categoria de materiais poliméricos provenientes de fontes renováveis e biodegradáveis, sendo compatíveis com sistemas de compostagem industrial e, em alguns casos, com sistemas de compostagem doméstica (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024). Desta forma, esta revisão narrativa analisa o uso do amido como matéria-prima para a indústria de bioplásticos, considerando tanto sua biodegradabilidade quanto suas principais limitações, como a alta hidrofilicidade e o desempenho mecânico ainda restrito. Além disso, o trabalho reúne as principais estratégias de modificação e reforço descritas na literatura, incluindo o desenvolvimento de blendas poliméricas e o uso de aditivos como as cargas particuladas. Tais estratégias possibilitam adequar as propriedades do amido às exigências das embalagens de uso único, permitindo discutir seu potencial como alternativa ambientalmente mais sustentável ao longo do ciclo de vida desses materiais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Discutir e analisar, a partir de estudos disponíveis na literatura, o potencial de bioplásticos e compósitos à base de amido como alternativa aos plásticos convencionais utilizados em embalagens alimentícias de uso único, considerando suas propriedades, limitações técnicas e implicações ambientais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar a estrutura química e as propriedades físico-químicas do amido, bem como os mecanismos envolvidos na obtenção do amido termoplástico;
- Analisar as principais limitações mecânicas, térmicas e de barreira dos bioplásticos à base de amido em aplicações de embalagens alimentícias;
- Avaliar estratégias de modificação e reforço descritas na literatura, incluindo plastificação, incorporação de cargas particuladas e desenvolvimento de blendas poliméricas;
- Comparar os impactos ambientais e as rotas de fim de vida dos bioplásticos à base de amido com os plásticos convencionais derivados de fontes fósseis;
- Apresentar e analisar estudos relacionados à biodegradabilidade e à ecotoxicidade de materiais à base de amido em diferentes condições ambientais.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em uma revisão narrativa da literatura científica sobre bioplásticos e compósitos à base de amido aplicados em embalagens alimentícias de uso único. A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Google Scholar, PubMed e ScienceDirect, mediante a combinação de palavras-chave em português e inglês, incluindo “bioplastics”, “starch”, “thermoplastic starch”, “food packaging”, “biodegradability”, “starch blends” e “environmental impact”, com o uso de operadores booleanos (AND, OR) para ampliar e refinar os resultados obtidos.

Foram considerados artigos científicos publicados no período de 2008 a fevereiro de 2026, com priorização de publicações dos últimos seis anos, a fim de contemplar os avanços científicos mais recentes na área. Foram privilegiados estudos experimentais, revisões sistemáticas e revisões narrativas que abordassem propriedades físico-químicas, desempenho mecânico, biodegradabilidade, ecotoxicidade e estratégias de modificação do amido. A seleção dos trabalhos ocorreu por meio da leitura prévia de título, resumo e conclusão, com o objetivo de verificar a pertinência temática. Posteriormente, os artigos que abordavam bioplásticos ou compósitos à base de amido com potencial aplicação em embalagens alimentícias, bem como estudos relacionados à sua biodegradabilidade, foram submetidos à leitura integral.

Além dos artigos científicos, foram consultados livros-texto nas áreas de ciência de alimentos e polímeros, assim como relatórios técnicos publicados por organizações do setor, como a *European Bioplastics*, a *Plastics Europe*, Abiplast e a Oceana, a fim de complementar a contextualização técnica e ambiental. Por fim, os estudos selecionados foram organizados tematicamente conforme os objetivos específicos estabelecidos, possibilitando uma análise qualitativa integrada das propriedades, limitações, estratégias de modificação e implicações ambientais dos materiais avaliados.

3 EMBALAGENS PARA ALIMENTOS

3.1 Funções

As embalagens plásticas, inicialmente utilizadas apenas como dispositivos de contenção nos seus primórdios, evoluíram significativamente ao longo do tempo. As características dos plásticos, como baixo custo, leveza, excelentes propriedades de barreira, resistência à tração e transparência aliados a processos de transformação consolidados que facilitam a sua produção são fatores que o tornaram um material atrativo para o uso do setor de alimentos, promovendo a indústria alimentícia como responsável pelo consumo de aproximadamente 40% do total de plástico produzido (Shlush; Davidovich-Pinhas, 2022; Tajeddin; Arabkhedri, 2020).

Atualmente, as embalagens utilizadas no setor de alimentos passaram a desempenhar outros três papéis principais além da contenção: proteção, conveniência e comunicação (Rosenow *et al.*, 2025; Shlush; Davidovich-Pinhas, 2022). No que se refere às funções de conveniência e comunicação, as embalagens são responsáveis por facilitar o transporte, o armazenamento e o consumo dos alimentos, além de atuar como um meio de informação e interação entre o produto e o consumidor.

Por sua vez, as funções de contenção e proteção desempenham um papel fundamental na extensão da vida útil dos alimentos, atuando como importantes aliadas no combate ao desperdício alimentar. Estima-se que cerca de 45% do desperdício de alimentos frescos decorra de perdas associadas às etapas de pós-colheita, processamento, transporte, armazenamento e ao uso de embalagens inadequadas (Das; Prathapan; Ng, 2024). Diante desse cenário, as embalagens contribuem para o acondicionamento adequado dos produtos e para a proteção contra a deterioração causada por fatores físicos, químicos e biológicos, preservando a qualidade e a segurança dos alimentos (Ncube *et al.*, 2021).

3.2 Embalagens plásticas no Brasil

Segundo dados da *Plastics Europe (2025)*, das 430,9 Mt de plásticos produzidas em 2024, as principais regiões produtoras foram a China (34,5%), o restante da Ásia (20,1%), a América do Norte (16,3%) e a União Europeia + Noruega, Suíça e Reino Unido (12%). A América Central e do Sul responderam por 3,7% da produção global no período. No contexto latino-americano, o Brasil destaca-se como o maior produtor de resinas plásticas, tendo produzido 7,46 Mt em 2024, o que corresponde a aproximadamente 1,73% da produção

mundial (Abiplast, 2025). Os setores alimentício e de construção civil figuram entre os principais consumidores desse material (De Andrade; De Araujo, 2025).

Globalmente, estima-se que os plásticos representem cerca de 12% do total de resíduos gerados, dos quais aproximadamente 40% são descartados no meio ambiente sem qualquer tipo de tratamento ou destinação adequada (De Andrade; De Araujo, 2025). Diante desse cenário, diversos países têm intensificado esforços para reduzir a produção e o consumo de plásticos, especialmente os de uso único. Nesse contexto, marcos regulatórios que estabelecem restrições a determinados produtos plásticos, como sacolas, sachês alimentícios, copos e canudos, têm sido implementados com o objetivo de conter o avanço desses resíduos. Por exemplo, a União Europeia adotou a Diretiva (UE) 2019/904, a China instituiu proibições nacionais em 2021 e, nos Estados Unidos, diversos estados implementaram restrições específicas a descartáveis (Kochanska *et al.*, 2022). Em contraste, o Brasil ainda não dispõe de uma legislação específica voltada exclusivamente à regulação de plásticos descartáveis. Essa lacuna é agravada pelo fato de que, embora as embalagens para produtos de curta vida útil sejam essenciais para mitigar o desperdício alimentar, elas se convertem rapidamente em resíduos pós-consumo (Ncube *et al.*, 2021). No país, embora a reciclagem seja amplamente difundida como principal estratégia de enfrentamento da poluição plástica, sua aplicação em embalagens alimentícias revela limitações técnicas, econômicas e sanitárias que comprometem sua efetividade.

No Brasil, o método de reciclagem mais comum é a reciclagem mecânica, caracterizada pelo reaproveitamento de resíduos plásticos pós-consumo, viabilizada por sistemas de coleta seletiva, cooperativas de reciclagem e pela atuação de catadores autônomos. Nesse processo, os resíduos são submetidos a triagem, classificação, lavagem, moagem e posterior granulação para a fabricação de novos materiais (Fraga, 2014). Todavia, no caso específico das embalagens alimentícias, a contaminação por resíduos orgânicos constitui uma das principais limitações ao processo de reciclagem, uma vez que gera custos adicionais relacionados à limpeza e ao processamento do material antes das etapas subsequentes (Boccalon; Gorrasi, 2022).

Adicionalmente, os materiais obtidos por reciclagem mecânica geralmente apresentam propriedades físico-químicas e mecânicas inferiores às dos polímeros virgens e, na maioria dos casos, não são considerados adequados para aplicações de grau alimentício. Essa limitação decorre principalmente do risco de contaminação intrínseco ao processo de reciclagem mecânica, o que restringe seu uso em embalagens primárias, isto é, aquelas em contato direto com alimentos. Como consequência, esses materiais são frequentemente destinados a aplicações de menor valor agregado ou a produtos com funções distintas da aplicação original,

caracterizando um processo de *downcycling* (Fraga, 2014; Neube *et al.*, 2021; Williams; Rangel-Buitrago, 2022). Esse cenário representa um problema significativo do ponto de vista ambiental e econômico, uma vez que limita a circularidade efetiva dos materiais plásticos e reduz o potencial de fechamento do ciclo produtivo no setor de embalagens alimentícias.

Em uma perspectiva nacional, para fazer frente a esses desafios e promover uma gestão mais eficiente, foi instituída a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa política versa sobre diferentes tipos de resíduos sólidos, incluindo os plásticos, e estabelece o princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, envolvendo fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e o poder público. Entre seus objetivos, estão a redução da geração de resíduos sólidos, aliada ao incentivo à reciclagem e à reutilização de materiais, bem como à adoção de insumos menos agressivos ao meio ambiente e de maior sustentabilidade (Brasil, 2010).

Apesar das diretrizes estabelecidas pela PNRS, a adesão aos programas de coleta seletiva no Brasil ainda se mostra limitada e desigual. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), apenas 3.364 municípios possuíam algum sistema de coleta seletiva, o que corresponde a 60,5% daqueles que realizam algum tipo de manejo de resíduos sólidos. Nos municípios com menos de 20.000 habitantes, a promoção de ações de incentivo à coleta seletiva é ainda mais restrita, atingindo menos de 48,6%. Adicionalmente, observa-se maior adoção de práticas sustentáveis em regiões mais desenvolvidas e com maior densidade populacional. As regiões Sul e Sudeste concentram a maior parte da produção e da reciclagem de plásticos no país, evidenciando a desigualdade regional na gestão de resíduos sólidos (De Andrade; De Araujo, 2025).

Como alternativa à mitigação dos impactos ambientais associados ao uso de plásticos convencionais, os materiais biodegradáveis obtidos a partir de fontes renováveis têm se destacado como uma opção promissora para aplicações em embalagens de uso único destinadas a produtos de curta vida útil (Abe *et al.*, 2021; Luchese; Rodrigues; Tessaro, 2021). Contudo, a adoção desses materiais não deve reforçar a concepção equivocada de que sua utilização confere permissão para o descarte inadequado. A ampliação do uso de bioplásticos biodegradáveis deve estar necessariamente associada ao avanço das tecnologias e dos sistemas de gestão de resíduos sólidos, conforme preconizado pela PNRS, que estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

O manejo adequado dos materiais plásticos deve envolver de forma integrada a indústria, os consumidores e o poder público, por meio da implementação de instrumentos

como a logística reversa, visando à reinserção desses resíduos em rotas ambientalmente adequadas, como a reciclagem ou a compostagem industrial (Negrete-Bolagay; Guerrero, 2024). A mitigação da poluição plástica requer abordagem sistêmica, que combine instrumentos regulatórios eficazes, fortalecimento da logística reversa, educação ambiental e o desenvolvimento de materiais capazes de se integrar de forma mais eficiente aos ciclos biogênicos, reduzindo a dependência de sistemas complexos de gestão e os impactos decorrentes de eventual disposição inadequada.

4 BIOPLÁSTICOS

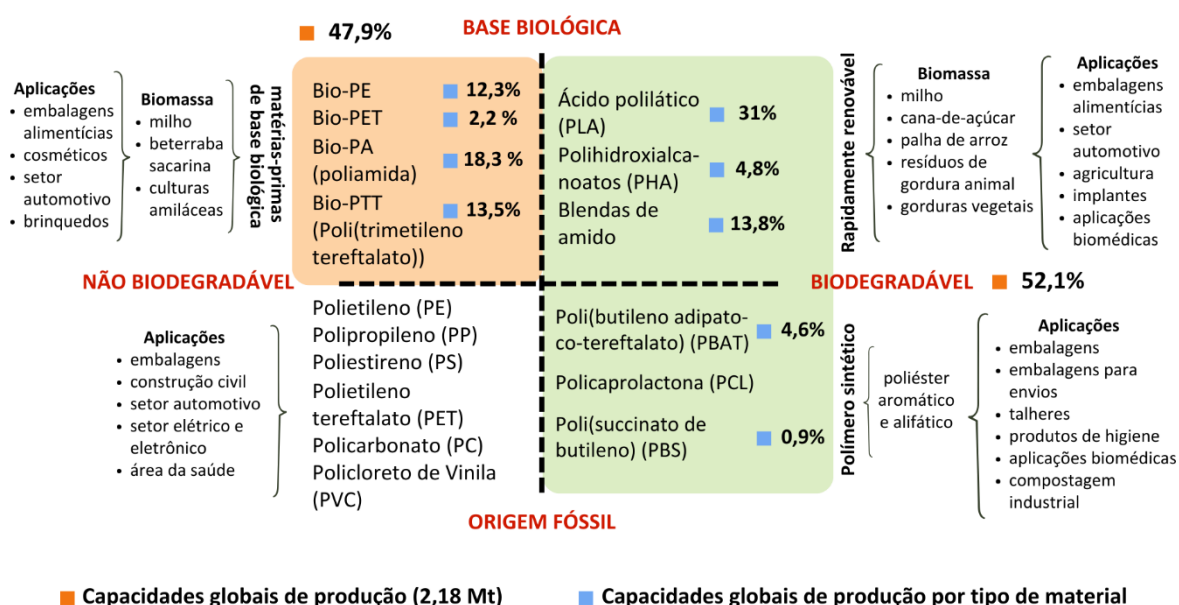
A palavra plástico deriva do grego *plastikos*, que significa “dar forma ou moldar”. Assim, os plásticos podem ser definidos como materiais poliméricos constituídos predominantemente por cadeias de carbono que, embora se apresentem no estado sólido em sua forma final, em alguma etapa de seu processamento podem ser amolecidos ou liquefeitos, tornando-se suscetíveis à moldagem por meio de calor e/ou pressão (Lokensgard, 2014). Segundo a *European Bioplastics*, para que um material plástico seja caracterizado como bioplástico é necessária a presença de uma ou ambas as características: ser derivado de base biológica, ou seja, derivado de biomassa de fontes renováveis e/ou ser biodegradável (Costa *et al.*, 2023; Jayarathna; Andersson; Andersson, 2022). A utilização de bioplásticos ainda representa uma pequena parcela da produção anual de plásticos. De acordo com dados da *Plastics Europe (2025)* a produção global de plásticos no ano de 2024 foi de 430,9 Mt, sendo apenas 0,6% desse total correspondente aos bioplásticos.

Embora frequentemente utilizados como sinônimos, os termos “biodegradável”, “degradável”, “oxodegradável” e “compostável” possuem significados distintos. O termo degradação é genérico e refere-se à capacidade de um material sofrer fragmentação ou alterações estruturais, processo que pode ocorrer por meio de fatores abióticos, como fotooxidação e degradação mecânica, química ou térmica (Lucas *et al.*, 2008). Os plásticos oxodegradáveis, por sua vez, correspondem a materiais aos quais são incorporados aditivos suscetíveis à degradação oxidativa, o que acelera a fragmentação do polímero quando exposto à radiação UV (Barron; Sparks, 2020). No entanto, mesmo após a perda da integridade estrutural e a fragmentação em partículas microscópicas, esses polímeros não são efetivamente assimilados por microrganismos, persistindo no ambiente sob a forma de microplásticos (Barron; Sparks, 2020; Shlush; Davidovich-Pinhas, 2022). Já no processo de biodegradação, há conversão do material em moléculas simples, como CO₂, CH₄ e H₂O, por meio da atividade de microrganismos (Barron; Sparks, 2020). Quando, além disso, o material apresenta uma taxa de biodegradação compatível com a de outros materiais reconhecidamente compostáveis, ele pode ser enquadrado como plástico compostável (Shlush; Davidovich-Pinhas, 2022).

Apesar de o termo “bioplástico” ser popularmente associado a biodegradabilidade, dada a definição da *European Bioplastics*, é possível que um polímero seja derivado de base biológica e, portanto, caracterizado como bioplástico, mas que não apresente biodegradabilidade. Por exemplo, poliolefinas podem ser produzidas a partir de etileno obtido

pela desidratação do bioetanol, gerado pela fermentação de açúcares provenientes de fontes como cana-de-açúcar e milho. Esse processo possibilita a obtenção de materiais como bio-PET, bio-PP e bio-PS que, apesar de serem derivados de fontes renováveis, apresentam propriedades e comportamento semelhantes aos de seus equivalentes de origem fóssil e não são prontamente biodegradáveis no ambiente (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024; Shlush; Davidovich-Pinhas, 2022). A Figura 1 representa um esquema acerca do espectro que abrange a terminologia de “bioplástico”.

Figura 1 – Divisão e aplicação dos bioplásticos



Fonte: Adaptado de Negrete-Bolagay; Guerrero, 2024

Conforme ilustrado na Figura 1, os bioplásticos podem ser classificados de acordo com sua origem e biodegradabilidade. Representados em laranja, encontram-se os materiais de origem biológica, porém não biodegradáveis, que correspondem a 47,9% da capacidade global de produção. Em contraste, representados em verde, estão os plásticos de origem biológica e/ou biodegradáveis, que correspondem a 52,1% da capacidade global de produção. Entre esses materiais, o amido e suas blendas destacam-se por constituírem o segundo grupo com maior capacidade produtiva da categoria, representando 13,8%, ficando atrás apenas do ácido polilático (PLA), com 31%.

Em decorrência da crescente demanda por materiais mais ecológicos, combinada com instrumentos regulatórios, como impostos e restrições ao uso de plásticos convencionais,

observa-se um cenário favorável à expansão do mercado de bioplásticos biodegradáveis nos próximos anos (Parveen *et al.*, 2024). Entre as alternativas de bioplásticos disponíveis, os materiais à base de amido destacam-se pelo baixo custo, ampla disponibilidade e seu caráter renovável, uma vez que o amido é um polissacarídeo amplamente extraído de fontes vegetais, como milho, mandioca e batata (Costa *et al.*, 2023; Negrete-Bolagay; Guerrero, 2024). Quando associado a plastificantes, umidade e temperatura, o amido adquire comportamento termoplástico, possibilitando seu processamento por técnicas relativamente simples em comparação a outros bioplásticos, o que o torna uma alternativa viável para a produção de embalagens e produtos descartáveis biodegradáveis (Garavito; Peña-Venegas; Castellanos, 2024). Devido à versatilidade de suas propriedades físico-químicas, que podem ser ajustadas para aprimorar o desempenho mecânico e reológico, os materiais à base de amido apresentam elevado potencial para aplicações industriais como alternativas aos plásticos convencionais, o que motivou sua escolha como objeto de estudo no presente trabalho.

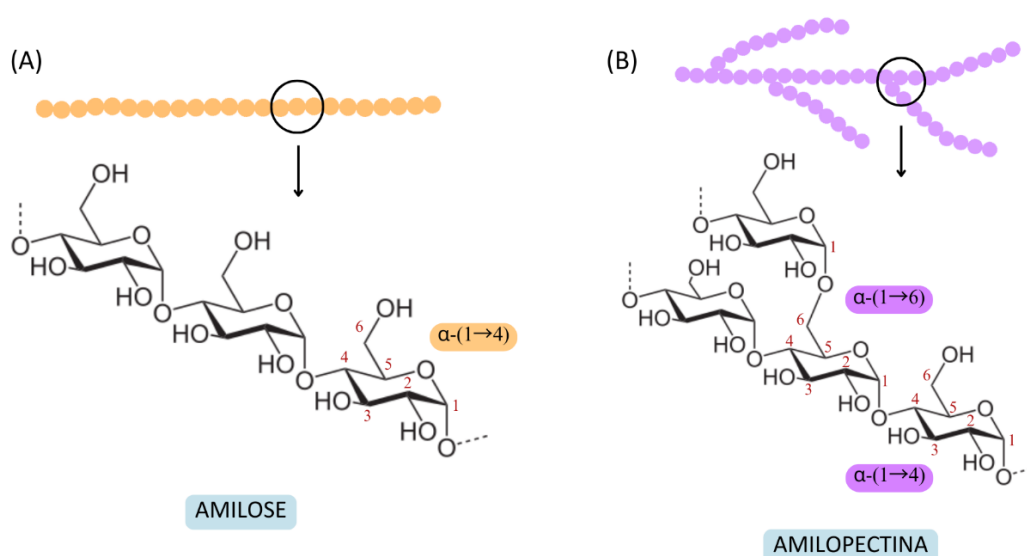
5 AMIDO NATIVO E AMIDO TERMOPLÁSTICO

5.1 Propriedades químicas e físicas do amido

O amido funciona como reserva nutricional e de energia em plantas superiores, que ocorrem como partículas parcialmente cristalinas denominadas de grânulos, cujo diâmetro varia entre $<1\ \mu\text{m}$ a $100\ \mu\text{m}$ (Jayarathna; Andersson; Andersson, 2022). O amido pode ser obtido a partir de sementes de cereais, de alguns tipos de arroz, tubérculos e raízes, sendo composto pela mistura de dois polissacarídeos: a amilose e a amilopectina. As proporções de amilose/amilopectina variam com a espécie, a maturação, o tipo de solo e as condições climáticas à qual a base vegetal foi submetida (Abe *et al.*, 2021; Damodaran; Parkin, 2019; Ribeiro; Seravalli, 2007).

A amilose é um polissacarídeo linear de α -D-glicopiranosos unidas por ligações glicosídicas α -(1 $\rightarrow$ 4) com massa molecular na ordem de grandeza de 10^5 a 10^6 , a depender da fonte vegetal de extração. A amilopectina é uma estrutura altamente ramificada, com cadeias lineares de 20 a 25 α -D-glicoses unidas por ligações α -(1 $\rightarrow$ 4) que, por sua vez, estão unidas entre si através de ligações glicosídicas α -(1 $\rightarrow$ 6). A massa molecular da amilopectina pode variar entre 10^5 e 10^9 (Damodaran; Parkin, 2019; Ribeiro; Seravalli, 2007). As estruturas da amilose e da amilopectina estão representadas na Figura 2, respectivamente.

Figura 2 – Estrutura da (a) amilose e (b) amilopectina



Fonte: Pereira *et al.*, 2025

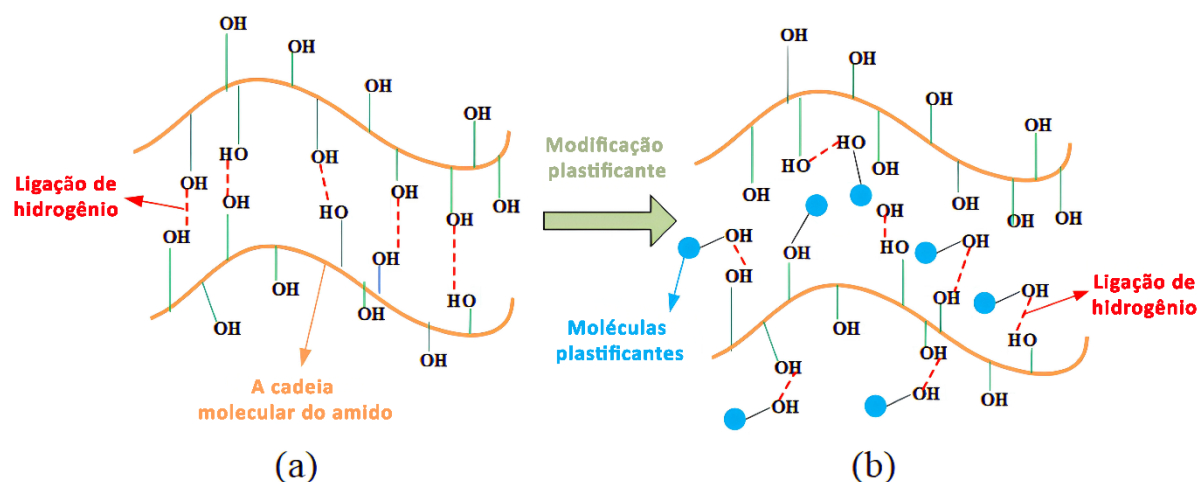
O amido pode ser obtido na forma de amido nativo (*native starch*, NS), no qual os grânulos encontram-se organizados em estruturas semicristalinas, compostas por regiões amorfas e cristalinas, ou na forma de amido termoplástico (*thermoplastic starch*, TPS). O TPS é produzido pela incorporação de plastificantes, isto é, moléculas de baixa massa molar, como água, glicerol e ureia, que penetram entre as longas cadeias de amilose e amilopectina, reduzindo as interações intermoleculares e aumentando a mobilidade das cadeias poliméricas. Em função de suas características termoplásticas, o TPS é a forma mais amplamente empregada em estudos e no desenvolvimento de bioplásticos (Rosenow *et al.*, 2025; Zhang; Rempel; Liu, 2014).

5.2 O amido termoplástico (TPS)

A preparação do TPS para produção de bioplásticos utiliza-se da ação combinada de plastificantes, temperatura, cisalhamento e umidade. Os plastificantes têm como função enfraquecer as interações intermoleculares no NS, de modo a aumentar a sua mobilidade e a diminuir a temperatura de transição vítrea (T_g) (Ivanič *et al.*, 2017; Montilla-Buitrago *et al.*, 2021). A T_g corresponde a uma faixa de temperatura na qual ocorre um aumento significativo da mobilidade das cadeias poliméricas presentes na fase amorfa, tanto em polímeros amorfos quanto na fração amorfa de polímeros semicristalinos, promovendo a transição do estado vítreo, rígido e frágil, para um estado borrachoso, caracterizado por maior flexibilidade (Lokensgard, 2014). Nesse sentido, a diminuição da T_g indica que o TPS passa a adquirir uma configuração mais flexível em temperaturas mais baixas.

No processo de plastificação, em um primeiro momento, sob a ação da temperatura e umidade, os grânulos de amido absorvem água, incham e se rompem, liberando amilose e amilopectina na solução. Esse processo é conhecido como gelatinização (Zhang; Rempel; Liu, 2014). Em seguida, com o aumento da temperatura, os grânulos de amido passam a se romper. Nesse estágio, as moléculas de plastificante penetram no interior dos grânulos, rompendo as ligações intermoleculares existentes entre as cadeias de amido e formando novas interações do tipo plastificante-amido. Esse processo aumenta o volume livre do sistema e, consequentemente, a mobilidade das cadeias poliméricas. Por fim, ocorre a formação do TPS, que passa a apresentar características típicas de materiais termoplásticos (Wu *et al.*, 2023). A Figura 3 ilustra a ação dos plastificantes sobre as cadeias do amido.

Figura 3 – Efeito da adição de plastificantes nas interações intermoleculares entre as cadeias de amido



Fonte: Adaptado de Wu *et al.*, 2023

A relação entre os teores de amilose e amilopectina exerce influência direta sobre a temperatura de gelatinização do amido, sendo que amidos com maior teor de amilose tendem a gelatinizar em temperaturas mais elevadas. Por exemplo, amidos com razão amilose/amilopectina de 70/30 gelatinizam em torno de 160–170 °C, enquanto amidos convencionais, com menor teor de amilose, apresentam gelatinização na faixa de 52–65 °C (Zhang; Rempel; Liu, 2014). Além disso, a proporção entre amilose e amilopectina afeta significativamente as propriedades mecânicas, reológicas e estruturais do TPS. De modo geral, amidos com maior teor de amilose tendem a originar materiais mais rígidos, com maior resistência mecânica e maior grau de cristalinidade. Por se tratar de um polímero de cadeia predominantemente linear, o aumento do conteúdo de amilose está associado à redução da transparência do material e pode dificultar o processo de biodegradação, em função da menor acessibilidade dos microrganismos às regiões cristalinas. Por sua vez, o TPS com predominância de amilopectina, devido à sua estrutura altamente ramificada, resulta em sistemas menos cristalinos, mais flexíveis e com maior transparência (Garavito; Peña-Venegas; Castellanos, 2024).

Diversos métodos podem ser utilizados para a obtenção de filmes flexíveis de amido. Entre as técnicas de baixo custo, destacam-se a moldagem por solvente (*casting*), na qual a solução formadora de filme é espalhada sobre um substrato e posteriormente seca para formação do filme, e a moldagem por fita, em que a solução é distribuída sobre uma fita

transportadora enquanto ocorre a evaporação do solvente. Por outro lado, técnicas mais sofisticadas, como a moldagem por compressão e a extrusão com sopro de filme, utilizam calor e pressão durante o processamento. Nesse último caso, o material precisa apresentar propriedades mecânicas adequadas para suportar as tensões geradas durante o processo de expansão da bolha de filme (Garavito; Peña-Venegas; Castellanos, 2024).

Dessa forma, para viabilizar o processamento de filmes à base de amido, geralmente são necessárias estratégias de modificação do material, como a adição de plastificantes. O uso de plastificantes contribui para o aumento da flexibilidade e da capacidade de alongamento do material, pois promove maior mobilidade das cadeias poliméricas. Em geral, plastificantes com menor tamanho molecular apresentam maior eficiência plastificante, uma vez que conseguem se inserir mais facilmente entre as cadeias do polímero, reduzindo as interações intermoleculares (Abe *et al.*, 2021).

Os plastificantes utilizados na produção de TPS devem apresentar baixa volatilidade, a fim de evitar perdas durante o processamento térmico, além de conter grupos polares capazes de estabelecer interações com as cadeias de amido. Entre os plastificantes estudados para a obtenção de TPS destacam-se polióis, aminas, amidas, ácidos carboxílicos e seus sais, líquidos iônicos, aminoácidos e açúcares (Montilla-Buitrago *et al.*, 2021). Alguns plastificantes, como o ácido cítrico, também podem atuar como agentes de reticulação, promovendo ligações entre as cadeias de amido e contribuindo para a melhoria de propriedades mecânicas e de estabilidade do material (Martínez-Villadiego; Arias-Tapia; Jaramillo, 2024).

Plastificantes capazes de promover interações mais intensas entre o amido e o plastificante têm sido associados a melhorias nas propriedades higroscópicas, térmicas e mecânicas dos materiais. Além disso, o uso de misturas de plastificantes tem sido apontado como um campo promissor de pesquisa, uma vez que pode gerar efeitos sinérgicos nas propriedades do material (Montilla-Buitrago *et al.*, 2021). Outras estratégias que podem contribuir para o aprimoramento do processamento e das propriedades desses filmes incluem a formação de blendas com outros polímeros e a incorporação de cargas e reforços que serão discutidas nas seções seguintes.

6 BIODEGRADABILIDADE E ECOTOXICIDADE

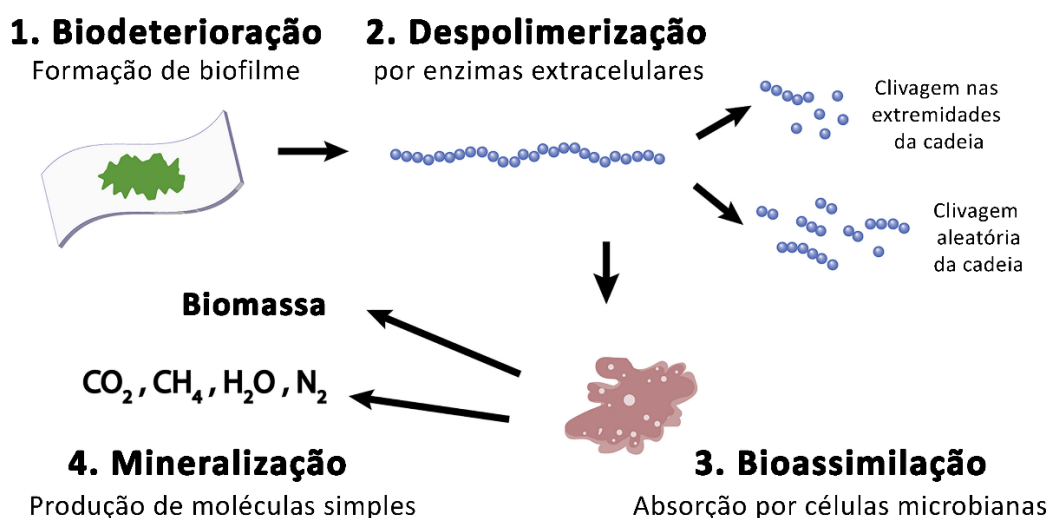
Plásticos derivados de fontes petroquímicas apresentam elevada pegada de carbono, ou seja, estão associados à emissão de CO₂ e de outros gases de efeito estufa ao longo de seu processo de produção, de forma direta ou indireta, o que tem estimulado o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis (Abe *et al.*, 2021; Shafqat *et al.*, 2020). Nesse cenário, a biodegradabilidade de polímeros provenientes de fontes renováveis representa um diferencial estratégico, pois a matéria-prima captura uma quantidade de CO₂ equivalente àquela liberada durante sua degradação, promovendo a reintegração do carbono ao ciclo biogeoquímico (Costa *et al.*, 2023). Além disso, a biodegradabilidade é desejável em plásticos com alto risco de dispersão acidental no ambiente (Di Bartolo; Infurna; Dintcheva, 2021), e confere aos bioplásticos menor persistência ambiental em comparação aos plásticos fósseis, que podem permanecer por séculos.

De acordo com Barron e Sparks (2020), o processo de biodegradação de polímeros pode ser dividido em quatro etapas principais: biodeterioração, despolimerização, bioassimilação e mineralização, conforme representado na Figura 4. Inicialmente, na **biodeterioração**, comunidades microbianas e outros organismos decompositores se estabelecem na superfície do polímero, formando um biofilme que, associado à ação de fatores abióticos, promove a fragmentação do material em partículas menores. Na sequência, durante a **despolimerização**, esses microrganismos liberam enzimas e radicais livres capazes de romper as cadeias poliméricas em diversos oligômeros, dímeros e monômeros. Parte desses compostos de menor tamanho é incorporada pelas células microbianas na etapa de **bioassimilação**, passando a participar do metabolismo celular gerando energia, biomassa e metabólitos primários e secundários. Por fim, na **mineralização**, esses metabólitos são convertidos em moléculas simples como CO₂, CH₄, H₂O, N₂ e sais minerais, que retornam ao ambiente (Lucas *et al.*, 2008).

No que diz respeito à biodegradação completa dos bioplásticos, ainda existem controvérsias na literatura. Diversos fatores, como a composição química, o peso molecular, a presença de aditivos e as condições às quais o material é submetido — incluindo temperatura, pH, umidade e a disponibilidade de microrganismos e nutrientes — influenciam significativamente os processos de biodegradação (Fojt *et al.*, 2020; Piyathilake *et al.*, 2024). A biodegradação depende da assimilação microbiana e de condições ambientais específicas. Quando tais condições não são atendidas, a degradação pode ocorrer de forma incompleta,

resultando na formação de micro e nanoplásticos de origem bioplástica (Shruti; Kutralam-Muniasamy, 2019). Embora se acredite que os biomicroplásticos apresentem menor persistência ambiental em comparação aos microplásticos derivados de polímeros convencionais, sua interação com o meio ambiente, incluindo a associação com outros sorventes e contaminantes, bem como seus potenciais efeitos ecotoxicológicos, configura um campo de pesquisa emergente e relevante (Fojt *et al.*, 2020; Piyathilake *et al.*, 2024).

Figura 4 – Etapas da biodegradação



Fonte: Adaptado de Barron; Sparks, 2020

Para a avaliação da biodegradabilidade de materiais plásticos, esses devem ser submetidos a ensaios padronizados que simulem as etapas do processo de biodegradação em um período relativamente curto, geralmente da ordem de alguns meses, por meio de metodologias estabelecidas por organismos normativos, como a Organização Internacional de Normalização (ISO), o Comitê Europeu de Normalização (CEN) e a Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM) (Di Bartolo; Infurna; Dintcheva, 2021). O método mais amplamente utilizado para a quantificação da biodegradação consiste no monitoramento do CO_2 liberado ou da produção de biogás pelos materiais estudados, permitindo inferir se o polímero foi efetivamente metabolizado por microrganismos (Kim *et al.*, 2023).

Estudos conduzidos por Narancic *et al.* (2018) avaliaram a biodegradabilidade do TPS em ambientes controlados e não controlados. Para certificação de biodegradação, os materiais deveriam atingir 90% de biodegradação em relação ao material de referência, a celulose. Em

ambientes de compostagem industrial (58 °C) e doméstica (28 °C), conforme a ISO 14855, os períodos máximos de teste foram de 180 dias e 1 ano, respectivamente. Para digestão anaeróbia em alto teor de sólidos (ISO 15985), o período mínimo de teste é de 15 dias. Quanto aos ambientes não controlados, o prazo máximo para avaliação em solo (ISO 17556) é de 2 anos, enquanto nos ambientes marinho (ASTM D6691) e de água doce (ISO 14851) são necessários, no mínimo, 28 dias de incubação. Para digestão anaeróbica aquática (ISO 14853), o período de teste estabelecido é de 56 dias.

Os resultados demonstraram que, sob condições de compostagem industrial, o TPS apresentou degradação completa em curto período, estimado em cerca de 22 dias. Além disso, o material degradou-se em todas as condições aquáticas avaliadas: ambiente marinho, água doce e digestão anaeróbia aquática. Seus tempos de residência estimados foram de 1–2 meses em água doce, cerca de 1 mês no ambiente marinho e 5–6 meses em solo, atendendo aos critérios internacionais de biodegradação.

No mesmo estudo, foi avaliada a biodegradabilidade de um material composto por policaprolactona (PCL) e TPS na proporção de 70/30, que, por sua vez, apresentou degradação mais lenta, exibindo biodegradação satisfatória em compostagem industrial, digestão anaeróbia, compostagem doméstica e solo. No entanto, não atendeu aos critérios de biodegradação nos ensaios conduzidos em ambientes aquáticos, especificamente em digestão anaeróbia aquática, água doce e ambiente marinho, com tempos de residência de aproximadamente 1,3 anos em água doce e 7 meses no ambiente marinho.

A Tabela 1 sumariza os resultados do estudo de Narancic *et al.*, (2018) e de outros trabalhos que abordam a biodegradabilidade de bioplásticos à base de amido.

Tabela 1 – Biodegradabilidade de materiais à base de amido relatados na literatura

(continua)

Material	Tamanho ou massa	Condição	Biodegradabilidade	Referência
PCL/TPS (70/30)	80g / 1200g de inóculo	Compostagem industrial a 58 °C e doméstica a 28 °C	Compostável em condições domésticas; em compostagem industrial atingiu o critério de biodegradação em ~46 dias	Narancic <i>et al.</i> , 2018
PCL/TPS (70/30)	2g / 500g de solo	Solo	Biodegradável; tempo de residência ~6 meses	Narancic <i>et al.</i> , 2018

(conclusão)

Material	Tamanho ou massa	Condição	Biodegradabilidade	Referência
PCL/TPS (70/30)	25 mg / reator de ~250 mL	Água doce e ambiente marinho	Tempo de residência estimado: ~1,3 anos (água doce) e ~7 meses (marinho)	Narancic <i>et al.</i> , 2018
TPS (milho); TPS (mandioca)	0,5 g	Enterramento no solo	Após 14 dias em solo normal, TPS (mandioca) e TPS (milho) atingiram ~40% e ~13% de degradação, respectivamente; solos enriquecidos com microrganismos aumentaram significativamente a biodegradação	Zounggran <i>et al.</i> , 2020
Amido/xilana	3,5 x 3,5 cm	Enterramento no solo / compostagem a 50 °C	Desaparecimento completo dos bioplásticos após 13 dias em solo e 3 dias em compostagem	Abe <i>et al.</i> , 2022
Espumas de TPS modificadas por acetilação, esterificação e sililação	0,7 g / 60 g de solo	Solo simulado	Após 28 dias, o TPS não modificado apresentou perda de massa de 92,72%, enquanto as espumas de TPS modificadas variaram entre 55–65%	Bergel <i>et al.</i> , 2022
PLA/TPS/PLA-g-MA (56/30/14)	8 g / 400 g de composto	Sistema de respirômetro de medição direta a 58°C	As blendas atingiram 100% de mineralização após 180 dias; PLA puro apresentou 77% no mesmo período	Mayekar <i>et al.</i> , 2023
PBAT/TPS (60/40); TPS não modificado e modificado (AS, OS, HS)	2% (m/m)	Compostagem a 58 °C	PBAT/TPS e PBAT/HS atingiram 99% de biodegradação no 8º dia; PBAT/AS e PBAT/OS alcançaram 97% e 98% nos 9º e 11º dias, respectivamente	Wongphan <i>et al.</i> , 2022

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Legenda: PCL = policaprolactona; TPS = amido termoplástico; PLA = ácido polilático; PLA-g-MA = ácido polilático enxertado com anidrido maleico; PBAT = poli(butileno adipato-co-tereftalato); AS, OS, HS = amidos termoplásticos modificados (acetilado, octenil-succinado e hidroxipropilado, respectivamente).

Os dados apresentados na Tabela 1 evidenciam que a biodegradabilidade de materiais à base de amido é fortemente dependente das condições ambientais, da formulação e das modificações químicas empregadas. De modo geral, sistemas contendo maior fração de TPS

apresentam degradação mais rápida, especialmente em condições de compostagem a temperaturas elevadas. Em contraste, em ambientes naturais menos controlados, como solo e água doce, o tempo de residência tende a ser significativamente maior, podendo alcançar meses ou até mais de um ano, conforme relatado anteriormente para blenda de PCL/TPS. Além disso, modificações químicas no TPS, como acetilação, esterificação e sililação, reduzem a taxa de degradação em comparação ao amido não modificado, indicando que o aumento da estabilidade estrutural compromete parcialmente a biodegradabilidade.

Além dos estudos de biodegradabilidade, tornam-se necessários ensaios que avaliem os efeitos dos bioplásticos após sua fragmentação, bem como suas interações com o ambiente (Ali; Isha; Chang, 2023). Bergel, Araujo e Santana (2022) investigaram a ecotoxicidade de espumas de TPS modificadas por acetilação, esterificação e sililação sobre a espécie *Allium cepa*. As amostras sililadas não apresentaram toxicidade, com crescimento radicular semelhante ao observado para o amido natural. Em contrapartida, as amostras acetiladas e esterificadas provocaram redução do crescimento e irregularidades nas raízes, efeito associado à acidificação do meio causada por essas modificações. Outro estudo, de Abe *et al.* (2022), avaliou a ecotoxicidade de bioplásticos à base de amido/xilana sobre a levedura *Saccharomyces cerevisiae* e a bactéria *Bacillus subtilis* após exposição a amostras de lavagem do solo provenientes do processo de desintegração. Os resultados indicaram ausência de inibição do crescimento microbiano após a biodegradação dos materiais. Além disso, a exposição de sementes de *Cucumis sativus* a essas amostras revelou uma inibição temporária do desenvolvimento de raiz e hipocótilo, associada às etapas intermediárias da desintegração.

Embora os estudos apresentem resultados promissores, ainda são restritos a condições específicas e a um número limitado de organismos. Assim, observa-se uma lacuna na literatura relacionada à escassez de estudos sobre os efeitos ecotoxicológicos dos bioplásticos, especialmente em solos e em ambientes não controlados, como os sistemas aquáticos. Ademais, a maioria das investigações concentra-se em altas concentrações de exposição, havendo limitação na avaliação dos impactos em níveis mais realistas, correspondentes àqueles efetivamente encontrados no ambiente (Nik Mut; Na; Jung, 2024). Estudos adicionais se tornam essenciais para a compreensão do impacto ambiental real desses materiais.

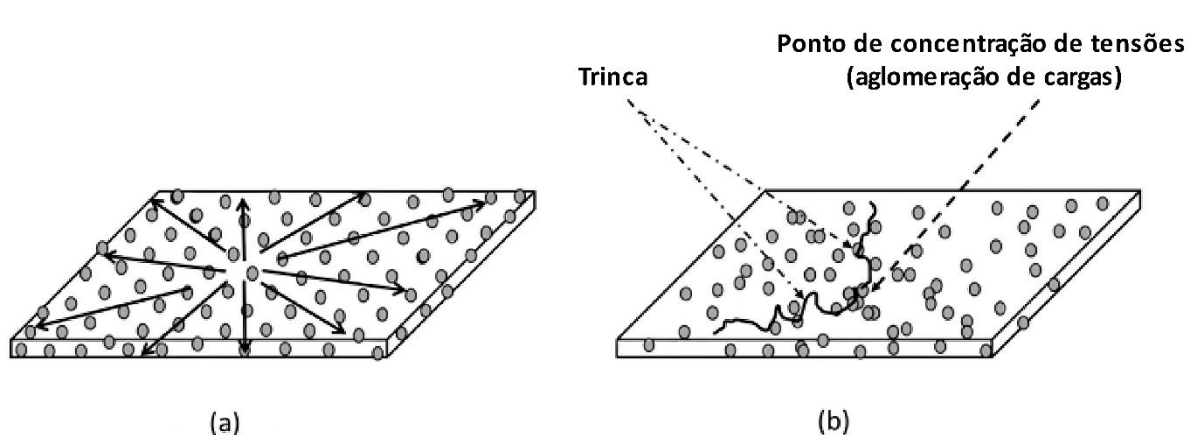
7 ADITIVOS NOS BIOPLÁSTICOS A BASE DE AMIDO

O TPS apresenta limitações significativas, principalmente relacionadas à sua elevada afinidade por água, decorrente do caráter hidrofílico do amido, bem como propriedades mecânicas inferiores quando comparadas às dos polímeros derivados do petróleo. Essas desvantagens comprometem seu desempenho estrutural, estabilidade dimensional e vida útil, restringindo sua aplicação em ambientes úmidos. Para contornar esse problema, a incorporação de cargas e a formação de blendas poliméricas têm sido estudadas como estratégia para aprimorar as propriedades físico-químicas e mecânicas do material (Sobeih *et al.*, 2025).

7.1 Cargas particuladas

As cargas são materiais particulados adicionados à matriz polimérica com a finalidade de melhorar suas propriedades mecânicas (DeArmitt, 2011). Quando homogeneamente dispersas, essas partículas elevam a resistência do compósito ao permitir a transferência eficiente de tensões da matriz para a carga, promovendo uma distribuição mais uniforme das tensões no material, conforme ilustrado na Figura 5a (Boey; Lee; Tay, 2022; Tan *et al.*, 2022). Em contrapartida, a aglomeração dessas partículas na matriz resulta em concentração de tensões, podendo levar à fratura do material, como mostrado na Figura 5b (Boey; Lee; Tay, 2022).

Figura 5 – Representação esquemática da distribuição de tensões em compósitos com cargas
(a) homogeneamente dispersas e (b) mal dispersas



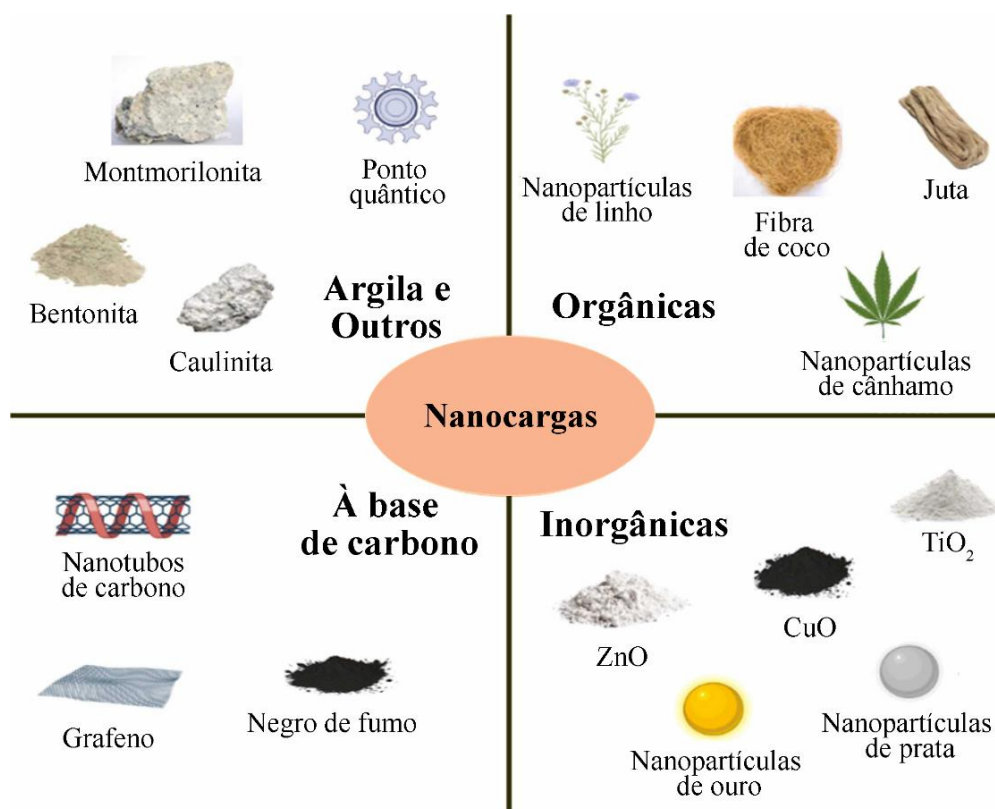
Fonte: Adaptado de Boey; Lee; Tay, 2022

Além de melhorar as propriedades mecânicas e a processabilidade, a incorporação de cargas, como materiais carbonáceos, filossilicatos e resíduos celulósicos, pode tornar o bioplástico economicamente mais viável, uma vez que esses materiais geralmente apresentam custo inferior (Boey; Lee; Tay, 2022; Yadav; Pal; Poonia, 2025).

As cargas em escala nanométrica, definidas como aquelas que apresentam ao menos uma de suas dimensões entre 1 e 100 nm, são denominadas nanocargas. De acordo com sua natureza química, podem ser classificadas em quatro grupos principais: inorgânicas, como minerais, metais e cerâmicas; orgânicas, derivadas de fontes vegetais, como fibras naturais; à base de carbono; e à base de argila, conforme representados na

Figura 6 (Yadav; Pal; Poonia, 2025).

Figura 6 – Categorias e exemplos de nanocargas

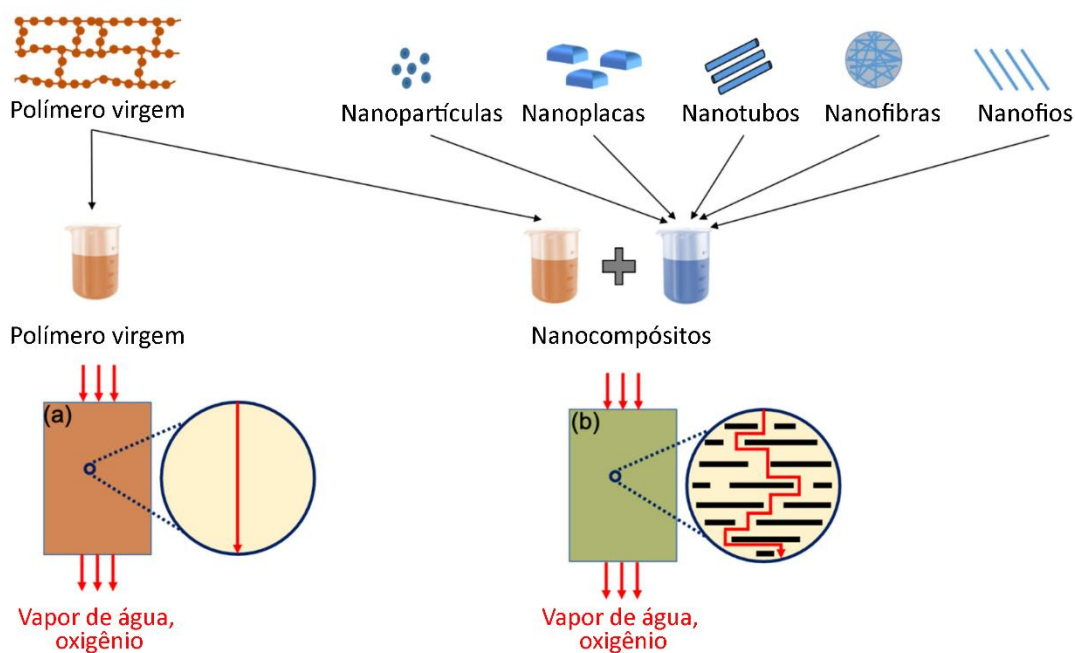


Fonte: Adaptado de Yadav; Pal; Poonia, 2025

Devido à elevada área superficial específica, esses materiais promovem interações interfaciais mais intensas com a matriz polimérica, favorecendo a modificação e o aprimoramento das propriedades mecânicas, térmicas e de barreira dos compósitos (Othman, 2014). A incorporação de nanocargas, quando adequadamente dispersas e uniformemente distribuídas na matriz, pode resultar em aumento significativo das propriedades de barreira a

gases, como O₂, CO₂ e outros compostos voláteis, mesmo em concentrações inferiores a 5%. Esse comportamento é atribuído ao aumento da tortuosidade do caminho de difusão, conforme ilustrado na Figura 7 (Attallah *et al.*, 2021; Othman, 2014).

Figura 7 – Efeito da tortuosidade nas propriedades de barreira de compósitos



Fonte: Adaptado de Attallah *et al.*, 2021

A adição de diferentes tipos de nanocargas, como nanopartículas, nanoplacas, nanotubos, nanofibras e nanofios provoca o aumento dos caminhos de difusão das moléculas gasosas (Attallah *et al.*, 2021). O aumento do percurso efetivo das moléculas gasosas ao longo da matriz polimérica, pelo efeito de tortuosidade, dificulta a difusão dos gases através do material (Mandal *et al.*, 2024; Othman, 2014).

Algumas nanocargas se destacam não apenas por melhorar as propriedades de barreira, mas também por atuarem como agentes antimicrobianos em embalagens alimentícias ativas (Yadav; Pal; Poonia, 2025). Algumas nanopartículas metálicas, como as de prata (AgNPs) e as de cobre (CuNPs), têm sido estudadas por serem agentes antimicrobianos eficientes. Ortega *et al.* (2017) investigaram a formação de filmes de TPS incorporados com AgNPs em concentrações de 14,3, 28,6, 71,5 e 143 ppm. Os filmes obtidos apresentaram homogeneidade, transparência e ausência de coloração perceptível. A atividade antimicrobiana foi avaliada contra as bactérias *E.coli*, *Salmonella* e *S. aureus*, bem como contra o fungo *Penicillium* spp. Observaram que o crescimento de *E. coli* e *Salmonella* foi significativamente inibido em filmes

contendo 71,5 ppm e 28,6 ppm de AgNPs, respectivamente, enquanto *S. aureus* não apresentou inibição. Quanto ao *Penicillium*, verificaram uma redução no crescimento fúngico em filmes com 28,6 ppm de AgNPs, sendo a inibição total alcançada em concentrações de 71,5 ppm. O filme com maior carga de AgNPs (143 ppm) foi aplicado como revestimento em queijo fresco com alto teor de umidade (46–55%), e a vida útil do produto foi avaliada com base na contagem de bolores e leveduras até atingir 10^6 UFC/g. O queijo controle apresentou vida útil de 14 dias, enquanto o revestido com o filme compósito manteve-se seguro para consumo por 21 dias. Os resultados demonstraram ser promissores, mas estudos futuros para investigar a migração das AgNPs devem ser conduzidos para garantir que o material possa ser aplicado em alimentos.

Complementarmente, López *et al.* (2020) promoveram o desenvolvimento de filmes de TPS funcionalizados com CuNPs e micropartículas de cobre revestidas com sílica (Si-Cu-MPs) de 0, 0,25, 0,50, 0,75, 1 e 5% (m/m). A adição das CuNPs aumentou a opacidade dos filmes e apresentou uma coloração mais intensa, que podem ser adequados para o uso em embalagens para alimentos suscetíveis à oxidação luminosa como, por exemplo, embalagens unitárias ou camadas protetoras entre fatias de produtos cárneos frescos, como hambúrgueres e frios. As CuNPs e Si-Cu-MPs foram testadas para avaliar sua capacidade antimicrobiana contra *E. coli* e *S. aureus*, demonstrando ser eficientes em todas as concentrações testadas. No estudo, a concentração de Cu lixiviado estava abaixo da concentração máxima permitida na água potável.

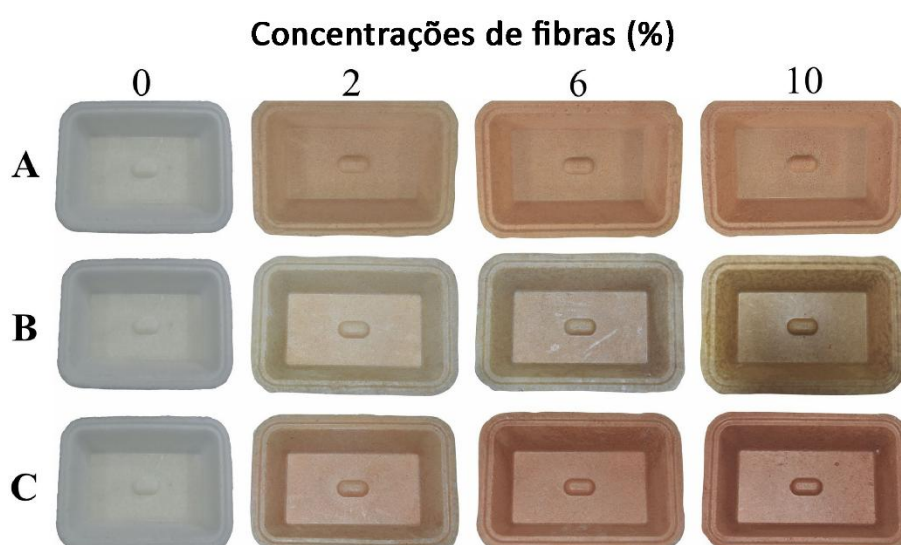
Além das nanopartículas metálicas, nanocargas carbonáceas também podem apresentar propriedades microbianas e antioxidantes. Estudos de Sun *et al.* (2024) descrevem uma rota para a síntese de uma nanocarga funcional, os pontos quânticos de grafeno (GQDs), utilizando amido de milho e polietilenoimina através de um método hidrotérmico a 190 °C. Os GQDs foram incorporados em uma matriz de amido e álcool polivinílico (PVA) nas concentrações de 50, 100 e 150 µg/mL para criar filmes de embalagem ativa. O aumento da concentração de GQDs elevou a opacidade dos filmes. Além disso, o uso de 100 µg/mL de GQDs otimizou as propriedades mecânicas, aumentando a resistência à tração em 2,94 vezes e o alongamento na ruptura em 1,79 vezes em relação ao filme sem aditivos. A resistência à água também foi aprimorada, com a solubilidade caindo para 27,44% na amostra com 100 µg/mL, quando comparada aos 60,81% do amido puro e 91,62% do PVA puro, resultado da reticulação entre a nanocarga e as cadeias poliméricas. Os filmes apresentaram ainda uma potente atividade antioxidante, atingindo uma taxa de sequestro de radicais 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) de 83,3% na concentração máxima de 150 µg/mL. Além disso, demonstraram atividade antibacteriana contra *S. aureus* e *E. coli*, que se tornou mais expressiva conforme o aumento da dosagem GQDs, devido ao estresse oxidativo promovido por seus grupos funcionais

oxigenados. O estudo demonstrou baixa citotoxicidade em testes com células humanas, sendo uma alternativa promissora e sustentável para o setor de embalagens alimentícias ativas.

Em comparação com as cargas inorgânicas, materiais orgânicos, como fibras naturais, têm despertado grande interesse por serem provenientes de fontes renováveis, biodegradáveis, amplamente disponíveis e de baixo custo (Versino; García, 2014). Alguns exemplos de cargas orgânicas incluem cascas de arroz, trigo, aveia e milho (Tabassum *et al.*, 2025), resíduos fibrosos da própria extração do amido de mandioca (Versino; García, 2014), carboximetilcelulose obtida a partir do bagaço de cana (Plaeyao *et al.*, 2025), folhas de bananeira e resíduos de uva (Jayarathna; Andersson; Andersson, 2022). Esses materiais mostram-se promissores como agentes de reforço em bioplásticos, pois são subprodutos de resíduos agroindustriais e agrícolas, contribuindo para sua valorização e agregando valor econômico a esses resíduos.

Por exemplo, estudos de Quispe-Sanchez *et al.* (2025) demonstraram a viabilidade de bandejas biodegradáveis de amido reforçadas com fibras lignocelulósicas de ceiba, café e cacau em diferentes proporções (2, 6 e 10%) obtidas pelo processo de termoformagem. As bandejas apresentaram uma biodegradabilidade significativa, com perda de massa entre 40% e 60% após 32 dias de exposição em solo. A Figura 8 ilustra os materiais obtidos no estudo.

Figura 8 – Bandejas feitas a partir de amido de mandioca e fibras de (a) ceiba, (b) café e (c) cacau a diferentes porcentagens



Fonte: Adaptado de Quispe-Sanchez *et al.*, 2025

Os resíduos lignocelulósicos tornaram-se alternativas promissoras para uso em bioplásticos à base de amido pois, além das características mencionadas, esses resíduos são polissacarídeos que apresentam similaridade estrutural com o amido. Essa característica promove alta compatibilidade e favorece as interações entre a carga e a matriz (Pongsuwan *et al.*, 2022).

7.2 Blendas e Compósitos com TPS

O TPS pode ser combinado com outros polímeros com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas, térmicas e de barreira, ampliando seu potencial de uso em aplicações como embalagens flexíveis, filmes, bandejas e utensílios descartáveis. Para isso, a formação de blendas poliméricas, isto é, a combinação de polímeros distintos em um mesmo sistema, tem sido amplamente empregada visando à obtenção de materiais com um melhor desempenho para aplicações nesse setor (Ramesh; Muthukrishnan, 2022).

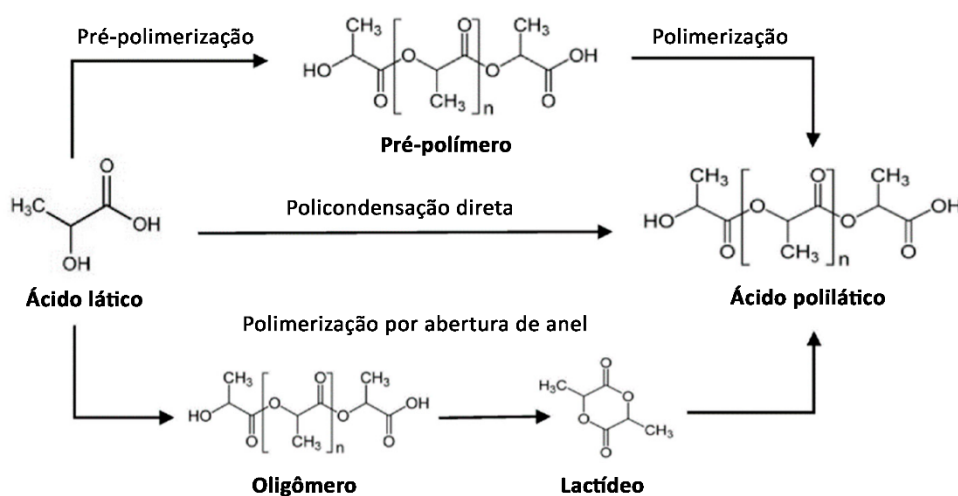
No desenvolvimento de bioplásticos, o TPS pode ser associado a diferentes classes de polímeros que se enquadram na definição de bioplásticos, incluindo polímeros sintéticos biodegradáveis, polímeros sintéticos de base biológica e outros polímeros de origem renovável (Jayarathna; Andersson; Andersson, 2022). No setor de embalagens alimentícias biodegradáveis, essas blendas desempenham papel estratégico não apenas na melhoria das propriedades mecânicas e de barreira, mas também na viabilização do processamento por técnicas industriais convencionais, como extrusão, injeção e termocompressão (Ramesh; Muthukrishnan, 2022).

Diversos estudos têm demonstrado a viabilidade do uso de bioplásticos à base de amido, especialmente na forma de blendas com outros polímeros biodegradáveis, para a produção de embalagens alimentícias e utensílios descartáveis (Shafqat *et al.*, 2020). Considerando que esta revisão adota um enfoque favorável ao uso de bioplásticos à base de amido como alternativa sustentável aos plásticos convencionais de uso único, o presente trabalho concentra-se na análise de pesquisas recentes que investigam blendas de TPS com outros polímeros biodegradáveis e/ou de base biológica.

7.2.1 Blendas de TPS/PLA

O ácido polilático (PLA) é um poliéster alifático cuja unidade monomérica é o ácido láctico, sendo este obtido pela fermentação de recursos renováveis como milho, cana-de-açúcar e batata (Swetha *et al.*, 2023). Atualmente, é um dos biopoliésteres mais estudados para o uso em embalagens primárias para alimentos líquidos como água, sucos e óleos; bem como para alimentos sólidos como açúcar, arroz e massas (Moldovan *et al.*, 2025). Existem três principais rotas para a produção de PLA: a policondensação direta, a polimerização em duas etapas e a polimerização por abertura de anel. Este último método é o mais amplamente utilizado e ocorre a partir da oligomerização do ácido láctico, seguida de sua condensação para formar monômeros de lactídeo, que são posteriormente polimerizados por abertura de anel com o auxílio de um catalisador para a formação de PLA de maior massa molar (Mak *et al.*, 2023). A Figura 9 ilustra as rotas para obtenção do PLA.

Figura 9 – Rotas para produção do PLA a partir do ácido láctico



Fonte: Adaptado de Mak *et al.*, 2023

A incorporação de TPS ao PLA constitui uma estratégia eficaz para reduzir o custo final do produto. No entanto, as blendas PLA/TPS apresentam baixa miscibilidade, decorrente do caráter hidrofílico do amido, que resulta em baixa compatibilidade interfacial com o PLA hidrofóbico (Martinez Villadiego *et al.*, 2022). Por exemplo, Nazrin, Sapuan e Zuhri (2020) investigaram o desenvolvimento de bionanocompósitos de blendas de TPS/PLA com teores de TPS de 20%, 30%, 40%, 60% e 80% m/m, utilizando amido extraído do tronco da palmeira-de-açúcar (*Arenga pinnata*), fonte de amido não convencional para alimentação, e 0,5% de fibras de nanocelulose da mesma fonte como reforço. O estudo, realizado sem o uso de

compatibilizantes, revelou uma morfologia co-contínua resultante da imiscibilidade entre as fases, o que gerou defeitos estruturais como vazios e rachaduras, elevando a fragilidade e reduzindo a resistência mecânica conforme o aumento da carga de TPS. Observou-se que o incremento da concentração de amido elevou proporcionalmente a densidade, a absorção de água e o inchamento em espessura do material, enquanto a baixa dosagem de nanocelulose não promoveu alterações significativas nas propriedades físicas. Por fim, os autores concluíram que, à exceção da amostra com 80% de TPS, as formulações apresentaram propriedades mecânicas aceitáveis para a aplicação em embalagens biodegradáveis.

De modo a melhorar a miscibilidade e a adesão entre as fases de TPS e PLA, diversos estudos têm se dedicado ao desenvolvimento de estratégias, como a aplicação de reticulação química, ponte anfifílica, modificação dos componentes e transição interfacial, visando à viabilização do uso dessas blendas em aplicações de embalagens alimentícias (Martinez Villadiego *et al.*, 2022). Comparativamente, Alikarami *et al.* (2022) demonstraram a preparação de blendas de PLA/TPS/nanoargila utilizando a enxertia de anidrido maleico (MA) no PLA (PLA-g-MA) como método de compatibilização, promovendo adesão interfacial entre o anel anidro do PLA-g-MA e os grupos hidroxila do TPS. A adição do compatibilizante melhorou a dispersão das gotículas de TPS na matriz de PLA e reduziu o tamanho médio das partículas dispersas. Além disso, a incorporação de 1% de nanoargila na fase de PLA reduziu a permeabilidade ao oxigênio em 55% em comparação com a blenda pura, devido à excelente dispersão da nanoargila que atua como escudo preventivo pelo efeito da tortuosidade, somado à presença de gotículas de TPS como barreira adicional. O estudo teve como objetivo ajustar as propriedades das blendas PLA/TPS para aplicação em embalagens alimentícias.

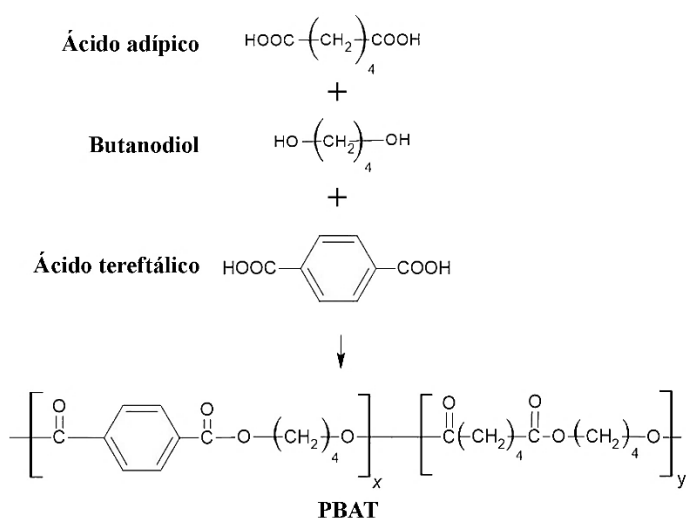
Apesar de apresentar propriedades como resistência à tração e permeabilidade a gases comparáveis às de polímeros sintéticos, o PLA possui como limitação sua taxa relativamente lenta de biodegradação. A incorporação do TPS ao PLA, além de contribuir para a redução de custos, constitui uma estratégia eficaz para aumentar a biodegradabilidade do material final (Akrami *et al.*, 2016). As características higroscópicas do amido, geralmente consideradas um fator limitante para a compatibilização com o PLA, atuam aqui como vantagem, favorecendo a absorção de água e, conseqüentemente, acelerando a hidrólise e a colonização microbiana. Como resultado, o período de latência observado na biodegradação do PLA puro é reduzido, uma vez que o amido atua como fonte inicial de carbono para os microrganismos, estimulando a atividade biológica enquanto a fase de PLA ainda se encontra em processo de hidrólise (Mayekar *et al.*, 2023). Apesar dos desafios relacionados à miscibilidade e à adesão interfacial, as blendas TPS/PLA configuram-se como uma alternativa promissora para embalagens

alimentícias rígidas e semirrígidas, permitindo conciliar desempenho estrutural e maior potencial de biodegradação em comparação ao PLA puro.

7.2.2 Blendas de TPS/PBAT

O poli(butileno adipato-co-tereftalato) (PBAT) é um bioplástico de origem sintética de alta flexibilidade, que pode ser sintetizado a partir da policondensação de butanodiol, ácido adípico e ácido tereftálico, conforme ilustrado na Figura 10 (Jian; Xiangbin; Xianbo, 2020; Roy *et al.*, 2024). Algumas empresas têm realizado esforços para substituir a fração de ácido adípico por ácido succínico derivado de biomassa; no entanto, os outros dois componentes, butanodiol e ácido tereftálico, ainda são integralmente de origem fóssil (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024).

Figura 10 – Síntese do PBAT

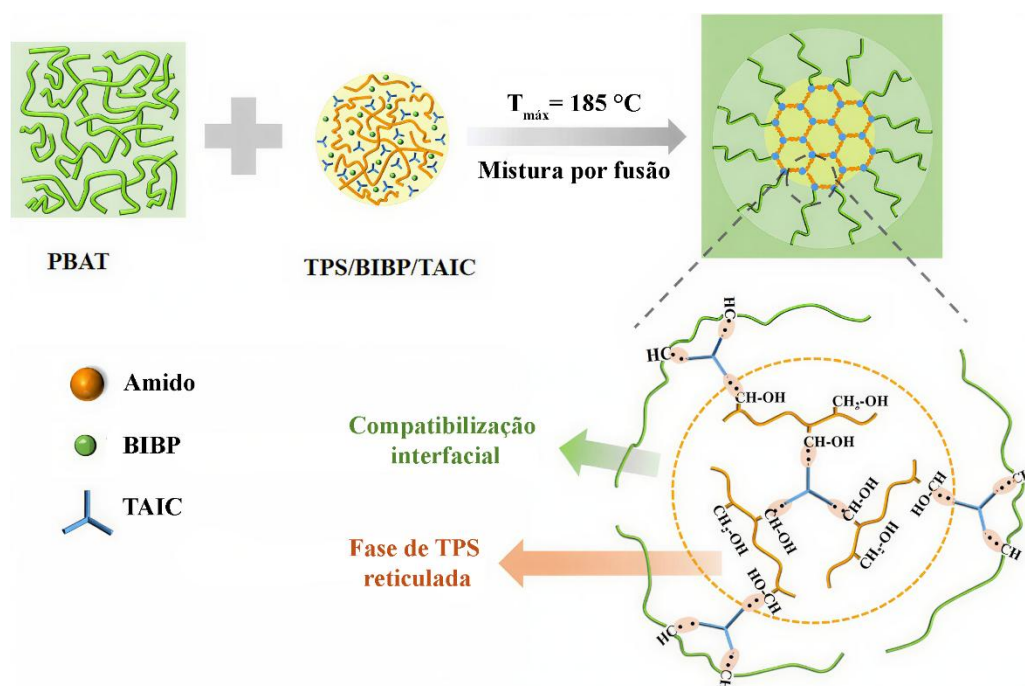


Fonte: Adaptado de Jian; Xiangbin; Xianbo, 2020

O PBAT é um bioplástico compostável e tem seu uso aprovado para o contato em embalagens alimentícias. Como as propriedades mecânicas do TPS são inferiores às do PBAT, o aumento de seu teor tende a reduzir o desempenho mecânico das blendas. No entanto, a incorporação de TPS a esse material pode reduzir os custos totais, além de elevar o conteúdo de matéria-prima de origem biológica, uma vez que o PBAT pode ser apenas parcialmente derivado de fontes renováveis. As blendas de PBAT/TPS mostram-se promissoras para aplicação em filmes finos como alternativa ao polietileno de baixa densidade (PEBD) (Cai *et al.*, 2024; Lackner *et al.*, 2021).

Assim como ocorre com o PLA, o PBAT apresenta caráter hidrofóbico, o que dificulta sua compatibilidade com o TPS, tornando necessárias estratégias específicas para aprimorar a compatibilização entre esses materiais. Diante disso, Cai *et al.* (2024) investigaram a obtenção de blendas PBAT/TPS a partir da produção de um TPS reticulado, empregando o iniciador bis(1-(terc-butilperóxi)-1-metiletil)-benzeno (BIBP) a 0,2% de massa, e o agente de reticulação 1,3,5-tri-2-propenil-1,3,5-triazina-2,4,6(1H,3H,5H)-triona (TAIC) nas concentrações de 0,3, 0,5, 1,0 ou 2,0%, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Produção de blendas de PBAT/TPS com o iniciador BIBP e o agente de reticulação TAIC



Fonte: Adaptado de Cai *et al.*, 2024

A adição do agente de reticulação TAIC promoveu um aumento progressivo da resistência à tração com o incremento de sua fração mássica, alcançando 25,43 MPa para o filme contendo 2% de TAIC, evidenciando uma mudança significativa em relação ao filme sem a presença desse agente. Esse comportamento foi acompanhado por uma redução gradual do alongamento na ruptura, atribuída à menor mobilidade das cadeias macromoleculares em decorrência da formação da rede reticulada. Adicionalmente, observou-se que a incorporação de TPS ao PBAT aumentou a taxa de degradação das blendas e, no que se refere à biodegradação, a presença do agente de reticulação não exerceu efeito adverso sobre a

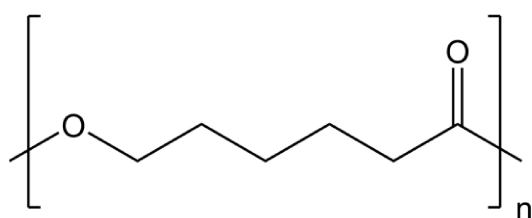
biodegradabilidade, não sendo constatada redução quando comparada aos filmes isentos de TAIC.

Adicionalmente, a incorporação de TPS ao PBAT também pode favorecer a reciclabilidade do material. Um estudo de Nomadolo *et al.* (2024) demonstrou que uma blenda PBAT/TPS (70/30) mantém boa reciclabilidade mecânica, mesmo após sete ciclos consecutivos de reprocessamento por extrusão no estado fundido, apresentando apenas pequenas variações no índice de fluidez. Adicionalmente, o reprocessamento contribuiu para uma melhor dispersão e miscibilidade da fase TPS na matriz de PBAT, sem comprometer propriedades mecânicas essenciais, como resistência à tração e ao impacto. Assim, as blends TPS/PBAT configuram uma alternativa promissora para embalagens flexíveis biodegradáveis, desde que estratégias eficazes de compatibilização sejam empregadas, mantendo desempenho mecânico, estabilidade estrutural e potencial de reciclabilidade.

7.2.3 Blendas de TPS/PCL

A policaprolactona (PCL) é um poliéster alifático semicristalino derivado do petróleo, cuja estrutura está representada na Figura 12. Esse polímero tem sido amplamente estudado em função de suas propriedades desejáveis, como baixo ponto de fusão, boa processabilidade térmica e baixa viscosidade, características que facilitam seu processamento industrial (Thakur *et al.*, 2021). Adicionalmente, sua hidrofobicidade e resistência a óleos a tornam particularmente atrativa para o setor de embalagens alimentícias (Nevoralová *et al.*, 2020). Em razão dessas características, o PCL apresenta potencial para a fabricação de embalagens flexíveis, bandejas, filmes aderentes e utensílios reutilizáveis, como pratos (Ntrivala *et al.*, 2025).

Figura 12 – Representação da estrutura da policaprolactona



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Ninago *et al.* (2015) investigaram a incorporação do PCL em teores de 2,5, 5 e 10% m/m, previamente submetida à hidrólise alcalina para aumentar a compatibilidade, em duas

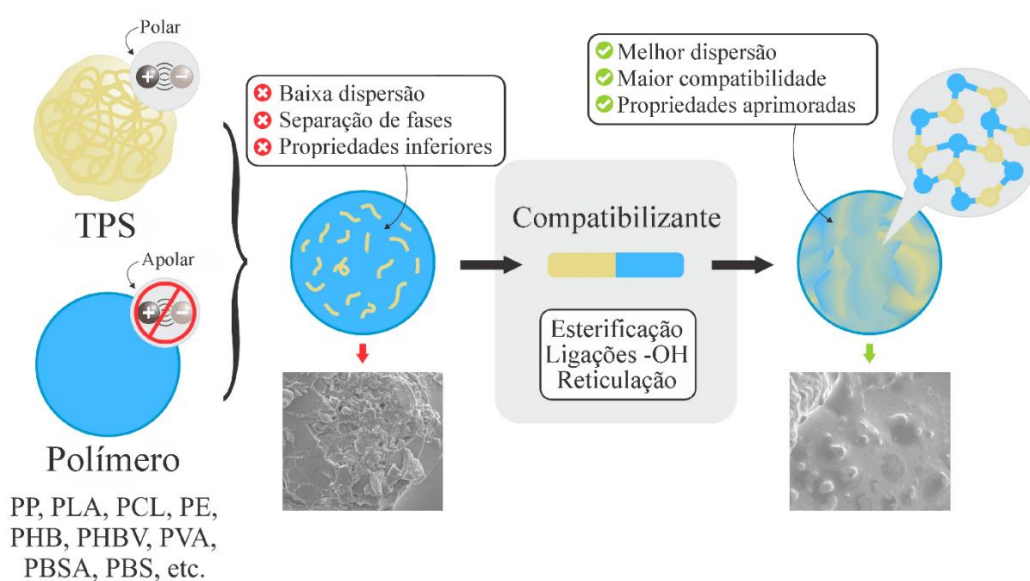
matrizes de TPS de milho: uma plastificada com glicerol (S_G) e outra com uma mistura de glicerol e alginato de sódio (S_{GA}). As análises de microscopia eletrônica de varredura demonstraram uma distribuição homogênea da PCL, indicando boa adesão na interface amido-poliéster, corroborada pelo deslocamento da banda de estiramento da carbonila da PCL de 1724 cm^{-1} para 1734 cm^{-1} nas análises por espectroscopia no infravermelho nas blendas, o que sugere interações químicas entre os componentes. A adição do poliéster aumentou a cristalinidade e a opacidade dos filmes, além de proporcionar um bloqueio mais eficiente à radiação UV devido ao efeito de barreira da PCL distribuída na matriz. A incorporação de PCL reduziu a permeabilidade ao vapor de água e diminuiu significativamente a solubilidade em água das blendas, tornando-as menos hidrofílicas. Ademais, a adição de PCL reduziu a T_g das fases ricas em glicerol e amido, o que aumentou a fluidez do material e favoreceu o seu processamento por injeção e termocompressão.

Em contrapartida, Nevoralová *et al.* (2020) exploraram blendas com maiores teores de PCL (30, 50 e 70% de PCL) preparadas por mistura em fusão. Enquanto a blenda PCL/TPS 70/30 exibiu partículas de TPS dispersas em matriz de PCL, as composições com maior teor de amido (50/50 e 30/70) apresentaram estruturas co-continuas, estabilizadas pela elevada elasticidade e comportamento do tipo gel do TPS no estado fundido, o que impediu a retração dos domínios para formas esféricas. Embora termodinamicamente imiscíveis, as fases apresentaram forte adesão interfacial e evidências de interações por ligações de hidrogênio entre os grupos carbonila do PCL e as hidroxilas do amido. Em contraste, Ortega-Toro *et al.* (2015) estudaram a formação de blendas de PCL/TPS (80, 60, 40 e 20% de PCL) utilizando o método de moldagem por compressão. No estudo, conduzido sem o uso de agentes compatibilizantes, foi evidenciada a imiscibilidade dos materiais, que apresentaram morfologia heterogênea nas micrografias eletrônicas de varredura. Diferentemente do estudo anterior, o processamento por compressão resultou em baixa adesão interfacial entre as fases, promovendo maior fragilidade dos filmes e redução significativa da capacidade de alongamento. Em pequenas proporções, o PCL levou ao aumento do módulo de elasticidade, indicando seu potencial como fase de reforço em matrizes de amido. Em relação às propriedades de barreira, o aumento do teor de PCL promoveu diminuição da permeabilidade ao vapor de água, em decorrência de seu caráter hidrofóbico, enquanto a permeabilidade ao oxigênio aumentou significativamente em comparação aos filmes de amido puro. Considerando aplicações no setor alimentício, os autores sugerem a produção de filmes bicamada PCL-amido para utilização em produtos cárneos e alimentos acondicionados sob atmosfera modificada, como salgadinhos.

Por fim, assim como observado para sistemas envolvendo PLA e PBAT, a incorporação de TPS acelera a taxa de biodegradação do PCL. A biodegradação das blendas PCL/TPS leva à formação inicial de vazios, em decorrência da degradação mais rápida da fase de amido. Esse processo aumenta a área superficial disponível para o ataque microbiano ao poliéster, favorecendo a progressão da degradação do material (Nevoralová *et al.*, 2020; Thakur *et al.*, 2021). Assim, embora termodinamicamente imiscíveis, as blendas TPS/PCL podem atingir desempenho funcional adequado mediante o controle da morfologia e da adesão interfacial, bem como pela incorporação de pequenas frações de PCL à matriz de amido. Nesse cenário, tais sistemas destacam-se como alternativas potenciais para substituição ao polietileno convencional em embalagens flexíveis (Ntrivala *et al.*, 2025).

Em síntese, o principal desafio na formulação de blendas envolvendo TPS reside na incompatibilidade termodinâmica decorrente da natureza hidrofílica do amido e do caráter hidrofóbico dos poliésteres. Esse obstáculo pode ser minimizado por meio da utilização de compatibilizantes, seja pela incorporação de agentes específicos, seja pela modificação química dos componentes, de modo a promover interações físicas ou químicas entre os grupos funcionais das cadeias poliméricas e reduzir a tensão interfacial entre as fases (Moreno-Bohorquez; Arias-Tapia; Jaramillo, 2026). A representação esquemática do processo de compatibilização entre o TPS e polímeros hidrofóbicos é apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Compatibilização entre TPS e polímeros hidrofóbicos



Fonte: Adaptado de Moreno-Bohorquez; Arias-Tapia; Jaramillo, 2026

A partir da compatibilização, a formação de blendas se torna uma estratégia poderosa para o ajuste das propriedades mecânicas, térmicas e de barreira. Além disso, a incorporação de TPS em outros biopolímeros auxilia na redução custos e no aumento do teor de matéria-prima renovável. Com base nos estudos discutidos, observa-se que blendas de TPS apresentam potencial para substituir polímeros convencionais em diversas aplicações no setor de embalagens. A Tabela 2 reúne um panorama de materiais à base de amido desenvolvidos, indicando suas possíveis substituições aos plásticos tradicionais reportadas na literatura.

Tabela 2 – Potenciais aplicações de materiais à base de amido na substituição de plásticos convencionais

Material	Substituição	Potencial aplicação	Referência
Espumas de TPS	EPS	Embalagens rígidas e semirrígidas	Jabeen <i>et al.</i> , 2015 Bergel <i>et al.</i> , 2022
Blenda de TPS/PBAT + aditivos (Mater-Bi EF03A0)	PEAD	Embalagens flexíveis	Ibarra-Valenzuela <i>et al.</i> , 2023
Blenda PBAT/TPS (70/30)	PEBD	Embalagens flexíveis	Nomadolo <i>et al.</i> , 2024
PLA/Amido	PS / PP	Embalagens rígidas e semirrígidas	Kurup <i>et al.</i> , 2025
PCL/Amido	PEBD	Embalagens flexíveis	Ntrivala <i>et al.</i> , 2025
TPS/Quitosana/AgNPs	Filmes de PVC	Embalagens flexíveis	Nogueira <i>et al.</i> , 2025

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Legenda: TPS = amido termoplástico; EPS = poliestireno expandido; PBAT = poli(butileno adipato-co-tereftalato); PEAD = polietileno de alta densidade; PEBD = polietileno de baixa densidade; PLA = ácido polilático; PCL = policaprolactona; PVC = policloreto de vinila; Mater-Bi EF03A0 = bioplástico comercial à base de PBAT/TPS.

Os bioplásticos à base de amido podem ser utilizados tanto em embalagens rígidas quanto em embalagens flexíveis (Jayarathna; Andersson; Andersson, 2022). Para as aplicações em embalagens rígidas, o TPS é um substituto promissor para embalagens de poliestireno (PS) (Jabeen; Majid; Nayik, 2015; Rahardiyana *et al.*, 2023). O PS é obtido pela polimerização do estireno, e o poliestireno expandido (EPS), mais conhecido como Isopor®, é produzido com PS em conjunto com agentes de sopro ou geradores de gás, resultando em um material espumoso utilizado em bandejas de alimentos, como carnes, verduras, ovos e frutas, e em marmitas (Lokensgard, 2014).

Dentre as aplicações para embalagens flexíveis, os filmes de TPS mostram-se promissores como substitutos do PEAD e do PEBD (Ibarra-Valenzuela *et al.*, 2023; Nomadolo *et al.*, 2024; Ntrivala *et al.*, 2025). Esse potencial é ampliado quando os filmes são reforçados com nanocargas que apresentam propriedades antioxidantes e antimicrobianas, conforme mencionado anteriormente. Assim, esses materiais tornam-se promissores para o desenvolvimento de embalagens alimentícias ativas para alimentos frescos, prolongando sua vida útil e contribuindo para a redução do desperdício alimentar (Liu *et al.*, 2022).

8 VANTAGENS, LIMITAÇÕES E PERSPECTIVAS

O aumento das restrições ao uso de plásticos convencionais cria um cenário favorável à expansão do mercado de bioplásticos biodegradáveis nos próximos anos (Parveen *et al.*, 2024). Estima-se que, nos próximos cinco anos, a capacidade de produção de bioplásticos de base biológica e biodegradáveis dobre, passando de 1,08 Mt em 2025 para aproximadamente 2,44 Mt em 2030, refletindo a crescente adoção desses materiais em diferentes aplicações (European Bioplastics, 2025).

Dentre os bioplásticos, o amido destaca-se por ser uma matéria vegetal abundante em diversas espécies, apresentando como vantagens a facilidade de extração da matéria-prima e a necessidade de uma infraestrutura produtiva mais simples quando comparada à de outros tipos de bioplásticos (Garavito; Peña-Venegas; Castellanos, 2024). Em comparação aos plásticos de origem fóssil, cuja produção consome cerca de 65% mais energia e gera de 30% a 80% mais gases de efeito estufa, os bioplásticos demonstram vantagens ambientais significativas. Essa menor pegada de carbono decorre, em grande parte, do fato de que as matérias-primas renováveis utilizadas absorvem CO₂ durante o crescimento, tornando esses materiais mais sustentáveis (Di Bartolo; Infurna; Dintcheva, 2021; Tajeddin; Arabkhedri, 2020).

Apesar dessas vantagens, o uso de matérias-primas vegetais levanta preocupações relacionadas ao desmatamento e à degradação da qualidade da água e do solo, em decorrência do manejo inadequado e do uso intensivo de pesticidas. Assim, torna-se necessária a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, como a agricultura orgânica e o uso de culturas locais, visando reduzir tais impactos (Parveen *et al.*, 2024). Além disso, destaca-se a possível competição com a produção de alimentos devido ao uso extensivo de terras agrícolas (Colwill *et al.*, 2012). Nesse sentido, uma das estratégias para otimizar a produção de bioplásticos tem sido concentrar pesquisas na obtenção de amido a partir de resíduos de outros processos industriais (Luchese; Rodrigues; Tessaro, 2021).

De modo geral, os bioplásticos apresentam custos superiores aos dos plásticos convencionais. No entanto, o TPS destaca-se por seu baixo custo comercial, frequentemente inferior a 1 US\$/kg, quando comparado a outros biopolímeros amplamente estudados, como o PLA (2,90–3,15 US\$/kg), PHA (6,0–6,5 US\$/kg), PCL (0,90–1,25 US\$/kg) e PBAT (1,55–1,75 US\$/kg) (Ghasemlou; Barrow; Adhikari, 2024). A incorporação do TPS a polímeros de maior valor agregado permite reduzir os custos de produção, além de aumentar a biodegradabilidade de biopolímeros menos degradáveis, como o PLA (Mayekar *et al.*, 2023).

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O amido é um polissacarídeo amplamente abundante, presente em diversas espécies vegetais, cujo uso como matéria-prima para a produção de bioplásticos mostra-se promissor, especialmente em função de sua ampla disponibilidade, baixo custo e facilidade de processamento quando comparado a outras matérias-primas de origem vegetal. As variações na proporção entre amilose e amilopectina, dependentes da fonte botânica do amido, influenciam diretamente propriedades fundamentais do material, como a temperatura de gelatinização e o desempenho mecânico dos bioplásticos obtidos.

Os bioplásticos à base de amido destacam-se por sua biodegradabilidade comprovada; entretanto, ainda apresentam limitações relacionadas às propriedades mecânicas e de barreira. Tais limitações podem ser mitigadas por meio da incorporação de aditivos, como cargas particuladas, e pela formação de blendas com outros polímeros biodegradáveis ou de base biológica. Dessa maneira, o uso de fibras e resíduos provenientes de fontes agroindustriais e agrícolas mostra-se particularmente promissor, uma vez que agrega valor a subprodutos de baixo custo.

Além disso, os filmes à base de amido apresentam menor pegada de carbono quando comparados aos plásticos convencionais, configurando-se como alternativas viáveis para uma gestão mais sustentável do fim de vida útil de embalagens de uso único. Esses materiais podem ser direcionados a rotas de valorização orgânica, como a digestão anaeróbia para produção de biogás e a compostagem para obtenção de composto, contribuindo para a inserção desses resíduos em um modelo de economia circular e evitando sua persistência no ambiente, característica típica dos plásticos convencionais.

O uso de amido e de cargas derivadas de resíduos agrícolas contribui para a redução dos custos do processo produtivo e minimiza a competição com o setor alimentício, reforçando o caráter sustentável desses materiais. Sendo assim, os bioplásticos à base de amido apresentam potencial como alternativa viável para mitigar a poluição plástica e reduzir a pressão sobre recursos naturais não renováveis, em consonância com as diretrizes da PNRS no Brasil. Ademais, diante das projeções de crescimento do mercado de bioplásticos, torna-se fundamental o desenvolvimento contínuo de soluções tecnológicas, aliado ao fortalecimento de sistemas adequados de coleta, identificação e manejo, bem como à atuação integrada entre setor produtivo, consumidores e o governo, visando à consolidação desses materiais em um modelo de economia circular.

10 REFERÊNCIAS

ABE, Mateus Manabu *et al.* Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from Starch and Lignocellulosic Components. **Polymers**, v. 13, n. 15, p. 2484, 28 jul. 2021.

ABE, Mateus Manabu *et al.* Production and assessment of the biodegradation and ecotoxicity of xylan- and starch-based bioplastics. **Chemosphere**, v. 287, p. 132290, jan. 2022.

ABIPLAST. **As Indústrias de Transformação & Reciclagem de Plástico no Brasil - Perfil 2025**. São Paulo: ABIPLAST, 2025. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2025/>. Acesso em: 6 dez. 2025.

AKRAMI, Marzieh *et al.* A new approach in compatibilization of the poly(lactic acid)/thermoplastic starch (PLA/TPS) blends. **Carbohydrate Polymers**, v. 144, p. 254–262, jun. 2016.

ALI, Shakir; ISHA; CHANG, Young-Cheol. Ecotoxicological Impact of Bioplastics Biodegradation: A Comprehensive Review. **Processes**, v. 11, n. 12, p. 3445, 17 dez. 2023.

ALIKARAMI, Niloofar *et al.* Compatibilization of PLA grafted maleic anhydride through blending of thermoplastic starch (TPS) and nanoclay nanocomposites for the reduction of gas permeability. **International Journal of Smart and Nano Materials**, v. 13, n. 1, p. 130–151, 2 jan. 2022.

ATTALLAH, Olivia A. *et al.* Macro and Micro Routes to High Performance Bioplastics: Bioplastic Biodegradability and Mechanical and Barrier Properties. **Polymers**, v. 13, n. 13, p. 2155, 30 jun. 2021.

BARRON, Amber; SPARKS, Taylor D. Commercial Marine-Degradable Polymers for Flexible Packaging. **iScience**, v. 23, n. 8, p. 101353, ago. 2020.

BERGEL, Bruno Felipe; ARAUJO, Ludmila Leite; SANTANA, Ruth Marlene Campomanes. Evaluation of toxicity and biodegradation of thermoplastic starch foams with modified starch. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 31, p. 100798, mar. 2022.

BOCCALON, Elisa; GORRASI, Giuliana. Functional bioplastics from food residual: Potentiality and safety issues. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 21, n. 4, p. 3177–3204, 29 jul. 2022.

BOEY, Jet Yin; LEE, Chee Keong; TAY, Guan Seng. Factors Affecting Mechanical Properties of Reinforced Bioplastics: A Review. **Polymers**, v. 14, n. 18, p. 3737, 7 set. 2022.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Informe Técnico nº 71, de 11 de fevereiro de 2016**. Brasília, DF: ANVISA, 2016.

BRASIL. Decreto nº 12.644, de 1 de outubro de 2025. Institui a Estratégia Nacional Oceano sem Plástico para o período de 2025 a 2030. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 2 out. 2025.

CAI, Kai *et al.* Enhancing the Mechanical Properties of PBAT/Thermoplastic Starch (TPS) Biodegradable Composite Films through a Dynamic Vulcanization Process. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 12, n. 4, p. 1573–1583, 29 jan. 2024.

COLWILL, J. A. *et al.* Bio-plastics in the context of competing demands on agricultural land in 2050. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 5, n. 1, p. 3–16, mar. 2012.

COSTA, Ana *et al.* Bioplastics: Innovation for Green Transition. **Polymers**, v. 15, n. 3, p. 517, 18 jan. 2023.

DAMODARAN, Srinivasan; PARKIN, Kirk L. **Química de alimentos de Fennema**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2019.

DAS, Partha Pratim; PRATHAPAN, Ragesh; NG, Kee Woei. Advances in biomaterials based food packaging systems: Current status and the way forward. **Biomaterials Advances**, v. 164, p. 213988, nov. 2024.

DE ANDRADE, Fernanda Nascimento; DE ARAUJO, Fábio Vieira. An analysis of the legal and management aspects of plastic waste in Brazil. **Sustainable Futures**, v. 10, p. 101120, dez. 2025.

DEARMITT, Chris. Functional Fillers for Plastics. *In*: **Applied Plastics Engineering Handbook**. [S.l.]: Elsevier, 2011. p. 455–468.

DI BARTOLO, Alberto; INFURNA, Giulia; DINTCHEVA, Nadka Tzankova. A Review of Bioplastics and Their Adoption in the Circular Economy. **Polymers**, v. 13, n. 8, p. 1229, 10 abr. 2021.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics market development update 2025**. Berlin: European Bioplastics, 2025. Disponível em: <https://www.european-bioplastics.org/news/publications/>. Acesso em: 16 fev. 2026.

FOJT, Jakub *et al.* A critical review of the overlooked challenge of determining micro-bioplastics in soil. **Science of The Total Environment**, v. 745, p. 140975, nov. 2020.

FRAGA, Simone Carvalho Levorato. **Reciclagem de Materiais Plásticos - Aspectos Técnicos, Econômicos, Ambientais e Sociais**. São Paulo: Érica, 2014.

GARAVITO, Johanna; PEÑA-VENEGAS, Clara P.; CASTELLANOS, Diego A. Production of Starch-Based Flexible Food Packaging in Developing Countries: Analysis of the Processes, Challenges, and Requirements. **Foods**, v. 13, n. 24, p. 4096, 18 dez. 2024.

GHASEMLOU, Mehran; BARROW, Colin J.; ADHIKARI, Benu. The future of bioplastics in food packaging: An industrial perspective. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 43, p. 101279, jun. 2024.

HASSOUN, Abdo *et al.* Creating new opportunities for sustainable food packaging through dimensions of industry 4.0: New insights into the food waste perspective. **Trends in Food Science & Technology**, v. 142, p. 104238, dez. 2023.

IBARRA-VALENZUELA, Ana Patricia *et al.* Replacement of conventional packaging with sustainable materials for corn tortillas. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 40, p. 101207, dez. 2023.

IBGE. **Perfil dos municípios brasileiros: gestão do saneamento básico: limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo de águas pluviais** : 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IVANIČ, František *et al.* Physical properties of starch plasticized by a mixture of plasticizers. **European Polymer Journal**, v. 93, p. 843–849, ago. 2017.

JABEEN, Nafisa; MAJID, Ishrat; NAYIK, Gulzar Ahmad. Bioplastics and food packaging: A review. **Cogent Food & Agriculture**, v. 1, n. 1, p. 1117749, 31 dez. 2015.

JAYARATHNA, Shishanthi; ANDERSSON, Mariette; ANDERSSON, Roger. Recent Advances in Starch-Based Blends and Composites for Bioplastics Applications. **Polymers**, v. 14, n. 21, p. 4557, 27 out. 2022.

JIAN, Jiao; XIANGBIN, Zeng; XIANBO, Huang. An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 3, n. 1, p. 19–26, jan. 2020.

KIM, Min Soo *et al.* A Review of Biodegradable Plastics: Chemistry, Applications, Properties, and Future Research Needs. **Chemical Reviews**, v. 123, n. 16, p. 9915–9939, 23 ago. 2023.

KOCHANSKA, Ewa *et al.* Global Ban on Plastic and What Next? Are Consumers Ready to Replace Plastic with the Second-Generation Bioplastic? Results of the Snowball Sample Consumer Research in China, Western and Eastern Europe, North America and Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 21, p. 13970, 27 out. 2022.

KOLLER, Martin; MUKHERJEE, Anindya. A New Wave of Industrialization of PHA Biopolyesters. **Bioengineering**, v. 9, n. 2, p. 74, 15 fev. 2022.

KURUP, Gautheman *et al.* Impact of processing parameters on the compatibility and performance of PLA/tapioca starch biocomposites for short-term food packaging applications. **Materials Today Communications**, v. 43, p. 111651, fev. 2025.

LACKNER, Maximilian *et al.* Mechanical properties and structure of mixtures of poly(butylene-adipate-co-terephthalate) (PBAT) with thermoplastic starch (TPS). **International Journal of Biobased Plastics**, v. 3, n. 1, p. 126–138, 1 jan. 2021.

LIU, Dandan *et al.* Recent Advances and Applications in Starch for Intelligent Active Food Packaging: A Review. **Foods**, v. 11, n. 18, p. 2879, 16 set. 2022.

LOKENS GARD, Erik. **Plásticos industriais : teoria e aplicações**. [S.l.]: Cengage Learning Edições Ltda, 2014.

LÓPEZ, Olivia V. *et al.* Flexible thermoplastic starch films functionalized with copper particles for packaging of food products. **Functional Composite Materials**, v. 1, n. 1, p. 6, 31 dez. 2020.

LUCAS, Nathalie *et al.* Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques – A review. **Chemosphere**, v. 73, n. 4, p. 429–442, set. 2008.

LUCHESI, Cláudia Leites; RODRIGUES, Raul Barth; TESSARO, Isabel Cristina. Cassava starch-processing residue utilization for packaging development. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 183, p. 2238–2247, jul. 2021.

MAK, Shu Lun *et al.* A Review of the Feasibility of Producing Polylactic Acid (PLA) Polymers Using Spent Coffee Ground. **Sustainability**, v. 15, n. 18, p. 13498, 8 set. 2023.

MANDAL, Subhash *et al.* Mechanistic insight into the role of the aspect ratio of nanofillers in the gas barrier properties of polymer nanocomposite thin films. **RSC Applied Interfaces**, v. 1, n. 5, p. 977–991, 2024.

MARTINEZ VILLADIEGO, Keydis *et al.* Thermoplastic Starch (TPS)/Polylactic Acid (PLA) Blending Methodologies: A Review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 30, n. 1, p. 75–91, 17 jan. 2022.

MARTÍNEZ-VILLADIEGO, Keydis; ARIAS-TAPIA, Mary Judith; JARAMILLO, Andrés F. Improving thermal stability of starches native cross-linked with citric acid as a compatibilizer for thermoplastic starch/polylactic acid blends. **Polymer Bulletin**, v. 81, n. 14, p. 13253–13274, 6 set. 2024.

MAYEKAR, Pooja C. *et al.* Breaking It Down: How Thermoplastic Starch Enhances Poly(lactic acid) Biodegradation in Compost—A Comparative Analysis of Reactive Blends. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, n. 26, p. 9729–9737, 3 jul. 2023.

MOLDOVAN, Andrei *et al.* Development and characterization of PLA food packaging composite. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 150, n. 4, p. 2469–2481, 27 fev. 2025.

MONTILLA-BUITRAGO, Camilo E. *et al.* Effect of Plasticizers on Properties, Retrogradation, and Processing of Extrusion-Obtained Thermoplastic Starch: A Review. **Starch - Stärke**, v. 73, n. 9–10, 16 set. 2021.

MORENO-BOHORQUEZ, Elizabeth; ARIAS-TAPIA, Mary Judith; JARAMILLO, Andrés F. Recent Advances in Thermoplastic Starch (TPS) and Biodegradable Polyester Blends: A Review of Compatibilization Strategies and Bioactive Functionalities. **Polymers**, v. 18, n. 2, p. 289, 21 jan. 2026.

NARANCIC, Tanja *et al.* Biodegradable Plastic Blends Create New Possibilities for End-of-Life Management of Plastics but They Are Not a Panacea for Plastic Pollution. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 18, p. 10441–10452, 18 set. 2018.

NAZRIN, A.; SAPUAN, S. M.; ZUHRI, M. Y. M. Mechanical, Physical and Thermal Properties of Sugar Palm Nanocellulose Reinforced Thermoplastic Starch (TPS)/Poly (Lactic Acid) (PLA) Blend Bionanocomposites. **Polymers**, v. 12, n. 10, p. 2216, 27 set. 2020.

NCUBE, Lindani Koketso *et al.* An Overview of Plastic Waste Generation and Management in Food Packaging Industries. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 12, 12 fev. 2021.

NEGRETE-BOLAGAY, Daniela; GUERRERO, Víctor H. Opportunities and Challenges in the Application of Bioplastics: Perspectives from Formulation, Processing, and Performance. **Polymers**, v. 16, n. 18, p. 2561, 10 set. 2024.

NEVORALOVÁ, Martina *et al.* Structure Characterization and Biodegradation Rate of Poly(ϵ -caprolactone)/Starch Blends. **Frontiers in Materials**, v. 7, 5 jun. 2020.

NIK MUT, Nik Nurhidayu; NA, Joorim; JUNG, Jinho. A review on fate and ecotoxicity of biodegradable microplastics in aquatic system: Are biodegradable plastics truly safe for the environment? **Environmental Pollution**, v. 344, p. 123399, mar. 2024.

NINAGO, Mario D. *et al.* Enhancement of thermoplastic starch final properties by blending with poly(ϵ -caprolactone). **Carbohydrate Polymers**, v. 134, p. 205–212, dez. 2015.

NOGUEIRA, Bruno Rafael; BACKX, Bianca Pizzorno; DELAZARE, Thais. Starch, pectin and chitosan-based bioplastics with silver nanoparticles: An eco-friendly alternative for the food industry. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 10, p. 100246, jun. 2025.

NOMADOLO, Nomvuyo *et al.* The Effect of Mechanical Recycling on the Thermal, Mechanical, and Chemical Properties of Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly (Butylene Succinate) (PBS), Poly (Lactic Acid) (PLA), PBAT-PBS Blend and PBAT-TPS Biocomposite. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 32, n. 6, p. 2644–2659, 19 jun. 2024.

NTRIVALA, Maria Angeliki *et al.* Polycaprolactone (PCL): the biodegradable polyester shaping the future of materials – a review on synthesis, properties, biodegradation, applications and future perspectives. **European Polymer Journal**, v. 234, p. 114033, jun. 2025.

OCEANA. **Fragmentos da Destruição**: impactos do plástico na biodiversidade marinha brasileira. Brasília, DF: Oceana, out. 2024.

ORTEGA, Florencia *et al.* Active composite starch films containing green synthesized silver nanoparticles. **Food Hydrocolloids**, v. 70, p. 152–162, set. 2017.

ORTEGA-TORO, Rodrigo *et al.* Physical and structural properties and thermal behaviour of starch-poly(ϵ -caprolactone) blend films for food packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 5, p. 10–20, set. 2015.

OTHMAN, Siti Hajar. Bio-nanocomposite Materials for Food Packaging Applications: Types of Biopolymer and Nano-sized Filler. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 2, p. 296–303, 2014.

PARVEEN, Naseeba *et al.* Bioplastic packaging in circular economy: A systems-based policy approach for multi-sectoral challenges. **Science of The Total Environment**, v. 945, p. 173893, out. 2024.

PEREIRA, João Paulo de Menezes *et al.* Amido de Mandioca: Química e Aplicações. *In: Química das Coisas*. Uberlândia: LAECC, 2025. v. 1.

PIYATHILAKE, Udara *et al.* Exploring the hidden environmental pollution of microplastics derived from bioplastics: A review. **Chemosphere**, v. 355, p. 141773, maio 2024.

PLAEYAO, Kittiya *et al.* Biodegradable antibacterial food packaging based on carboxymethyl cellulose from sugarcane bagasse/cassava starch/chitosan/gingerol extract stabilized silver nanoparticles (Gin-AgNPs) and vanillin as cross-linking agent. **Food Chemistry**, v. 466, p. 142102, fev. 2025.

PLASTICS EUROPE. **Plastics the Fast Facts 2025**. Brussels: Plastics Europe, 2025. Disponível em: <https://plasticseurope.org/>. Acesso em: 6 dez. 2025.

PONGSUWAN, Chonlada *et al.* Banana inflorescence waste fiber: An effective filler for starch-based bioplastics. **Industrial Crops and Products**, v. 180, p. 114731, jun. 2022.

QUISPE-SANCHEZ, Luz *et al.* Biodegradable trays of cassava starch reinforced with Ceiba, coffee and cocoa fibers: a sustainable alternative to plastics. **Applied Food Research**, v. 5, n. 2, p. 101277, dez. 2025.

RAHARDIYAN, Dino *et al.* Thermoplastic starch (TPS) bioplastic, the green solution for single-use petroleum plastic food packaging – A review. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 168, p. 110260, ago. 2023.

RAMESH, M.; MUTHUKRISHNAN, M. Biodegradable polymer blends and composites for food-packaging applications. *In: Biodegradable Polymers, Blends and Composites. [S.l.]*: Elsevier, 2022. p. 693–716.

RIBEIRO, Eliana Paula.; SERAVALLI, Elisena A. G. **Química de alimentos**. São Paulo: Blucher, 2007.

ROSENOW, Phil *et al.* Design, New Materials, and Production Challenges of Bioplastics-Based Food Packaging. **Materials**, v. 18, n. 3, p. 673, 3 fev. 2025.

ROY, Swarup *et al.* Recent progress in PBAT-based films and food packaging applications: A mini-review. **Food Chemistry**, v. 437, p. 137822, mar. 2024.

SHAFQAT, Arifa *et al.* A review on environmental significance carbon foot prints of starch based bio-plastic: A substitute of conventional plastics. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 27, p. 101540, ago. 2020.

SHLUSH, Eden; DAVIDOVICH-PINHAS, Maya. Bioplastics for food packaging. **Trends in Food Science & Technology**, v. 125, p. 66–80, jul. 2022.

SHRUTI, V. C.; KUTRALAM-MUNIASAMY, Gurusamy. Bioplastics: Missing link in the era of Microplastics. **Science of The Total Environment**, v. 697, p. 134139, dez. 2019.

SOBEIH, Mahmoud Omar *et al.* Starch-Derived Bioplastics: Pioneering Sustainable Solutions for Industrial Use. **Materials**, v. 18, n. 8, p. 1762, 11 abr. 2025.

SUN, Qi *et al.* Modification of starch-derived graphene quantum dots as multifunctional nanofillers to produce polymer starch/polyvinyl alcohol composite films for active packaging. **LWT**, v. 198, p. 115953, abr. 2024.

SWETHA, T. Angelin *et al.* A comprehensive review on polylactic acid (PLA) – Synthesis, processing and application in food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 234, p. 123715, abr. 2023.

TABASSUM, Zeba *et al.* Trash to treasure: advancing resource efficiency using waste-derived fillers as sustainable reinforcing agents in bioplastics. **Materials Advances**, v. 6, n. 2, p. 527–546, 2025.

TAJEDDIN, Behjat; ARABKHEDRI, Mina. Polymers and food packaging. *In: Polymer Science and Innovative Applications*. [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 525–543.

TAN, Shiou Xuan *et al.* A Comprehensive Review on the Emerging Roles of Nanofillers and Plasticizers towards Sustainable Starch-Based Bioplastic Fabrication. **Polymers**, v. 14, n. 4, p. 664, 10 fev. 2022.

THAKUR, Mamta *et al.* Poly(ϵ -caprolactone): A potential polymer for biodegradable food packaging applications. **Packaging Technology and Science**, v. 34, n. 8, p. 449–461, 15 ago. 2021.

TIRKEY, Anita; UPADHYAY, Lata Sheo Bachan. Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics. **Marine Pollution Bulletin**, v. 170, p. 112604, set. 2021.

VERSINO, Florencia; GARCÍA, María Alejandra. Cassava (*Manihot esculenta*) starch films reinforced with natural fibrous filler. **Industrial Crops and Products**, v. 58, p. 305–314, jul. 2014.

WELLE, Frank. Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 865–875, set. 2011.

WILLIAMS, Allan T.; RANGEL-BUITRAGO, Nelson. The past, present, and future of plastic pollution. **Marine Pollution Bulletin**, v. 176, p. 113429, mar. 2022.

WONGPHAN, Phanwipa; PANRONG, Theeraphorn; HARNKARNSUJARIT, Nathdanai. Effect of different modified starches on physical, morphological, thermomechanical, barrier and biodegradation properties of cassava starch and polybutylene adipate terephthalate blend film. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 32, p. 100844, jun. 2022.

WU, Yue *et al.* Enhancing Starch-Based Packaging Materials: Optimization of Plasticizers and Process Parameters. **Materials**, v. 16, n. 17, p. 5953, 30 ago. 2023.

YADAV, Venkateshwar; PAL, Dharm; POONIA, Anil Kumar. Exploring nanofillers: Enhancing properties in biopolymer food packaging materials—A comprehensive review. **Environmental Pollution and Management**, v. 2, p. 256–270, dez. 2025.

YANG, Te *et al.* Upcycling of PET waste: from one polymer to another polymer. **Polymer Chemistry**, v. 17, n. 1, p. 7–20, 2026.

ZHANG, Yachuan; REMPEL, Curtis; LIU, Qiang. Thermoplastic Starch Processing and Characteristics—A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 54, n. 10, p. 1353–1370, 24 jan. 2014.

ZOUNGRANAN, Yacouba *et al.* Influence of natural factors on the biodegradation of simple and composite bioplastics based on cassava starch and corn starch. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 104396, out. 2020.