CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

GABRIELA ALVARO SAMPAIO

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ÁCIDO TARTÁRICO E ÓLEO DE MAMONA NAS PROPRIEDADES DE FILMES DE AMIDO TERMOPLÁSTICO

BELO HORIZONTE
2026

GABRIELA ALVARO SAMPAIO

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE ÁCIDO TARTÁRICO E ÓLEO DE MAMONA NAS PROPRIEDADES DE FILMES DE AMIDO TERMOPLÁSTICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Dalseno Antonino

BELO HORIZONTE

2026

Sampaio, Gabriela Alvaro.
S192i Influência da adição de ácido tartárico e óleo de mamona nas propriedades de filmes de amido termoplástico / Gabriela Alvaro Sampaio. – 2026.
77 f. : il.
Orientador: Leonardo Dalseno Antonino.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2026.
Bibliografia.

1. Ácido tartárico. 2. Plásticos - Aditivos. 3. Plásticos biodegradáveis. 4. Plastificante. 5. Óleo de mamona. I. Antonino, Leonardo Dalseno. II. Título.

CDD: 668.423

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecária: Rosiane Maria Oliveira Gonçalves - CRB6-2660

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 11 / 2026 - CEMAT (11.51.06)

Nº do Protocolo: 23062.034348/2026-19

Belo Horizonte-MG, 02 de julho de 2026.

FOLHA DE APROVAÇÃO
Defesa Final do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) 2026/1

Aos **19 dias do mês de junho de 2026**, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Campus Nova Suíça, a aluna **Gabriela Álvaro Sampaio**, matrícula 20203006856, apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado *Influência da Adição de Ácido Tartárico e Óleo de Mamona nas Propriedades de Filmes de Amido Termoplástico*, como parte do requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, o qual foi **APROVADO** pela Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leonardo Dalseno Antonino (Orientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.ª Dr.ª Mayra Aparecida Nascimento
ICentro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.ª Ma. Mariane Aparecida Pereira de Carvalho
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 09:46)
LEONARDO DALSENO ANTONINO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 3385664

(Assinado digitalmente em 03/07/2026 12:40)
MARIANE APARECIDA PEREIRA DE CARVALHO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 1320485

(Assinado digitalmente em 06/07/2026 08:22)
MAYRA APARECIDA NASCIMENTO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DEMAT (11.55.06)
Matrícula: 3255019

Visualize o documento original em **https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp** informando seu número: **11**, ano: **2026**, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: **02/07/2026** e o código de verificação: **67ed9ca507**

AGRADECIMENTOS

À Deus, obrigada pela vida, pela saúde, pela força.

Aos meus pais, Mônica e Hamilton, que sempre fizeram questão que eu colocasse os estudos em primeiro lugar e batalharam muito para me proporcionar o melhor tratamento médico possível. Sem eles, essa conquista jamais seria possível.

Ao meu namorado, Nicolas, sempre muito compreensivo e carinhoso. Obrigada por me apoiar, por estar do meu lado nos momentos mais difíceis e por me ajudar a sempre olhar o mundo com os olhos da positividade.

Ao CEFET-MG, pela formação acadêmica e profissional. Obrigada por me possibilitar a conquista da graduação e pela disponibilização dos laboratórios e equipamentos para a realização deste trabalho.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Leonardo Dalseno Antonino, pela paciência, disposição, gentileza, orientação e incentivo. Obrigada pelos aprendizados valiosos.

Aos demais que me ajudaram direta e indiretamente na realização deste trabalho, professores, técnicos e colegas de curso. Em especial, ao Nikolas Vasconcellos, por todo tempo que disponibilizou e suporte que me deu para obtenção dos resultados e à Eyshila Samara pelas conversas, risadas e companhia de muitas horas no laboratório.

RESUMO

O uso de plásticos de origem fóssil vem trazendo à tona uma grande preocupação quanto à sustentabilidade e acúmulo de resíduos no meio ambiente, especialmente os plásticos de uso único. Nessa ótica, os polímeros biodegradáveis se apresentam como potenciais substitutos. Dentre eles, o amido termoplástico (TPS) destaca-se como uma alternativa viável, embora apresente propriedades limitadas, tais como fragilidade mecânica, instabilidade estrutural e alta sensibilidade à umidade. O presente estudo teve como objetivo desenvolver filmes de TPS e analisar o potencial do ácido tartárico (AT) e do óleo de mamona (OM) em diferentes concentrações para superar essas limitações. A metodologia consistiu na preparação de filmes de TPS plastificados com glicerol, incorporando AT e OM nas proporções de 5% e 15% e na formulação mista de 7,5% de ambos. Avaliou-se as propriedades mecânicas, térmicas, estruturais, de superfície, de barreira e a biodegradabilidade. Os resultados indicaram que a atuação dos aditivos é dependente da concentração. Os aditivos agiram como agente de reticulação, criando ligações éster com a matriz de amido, com maior grau de esterificação nas amostras com AT. A incorporação de AT melhorou a rigidez mecânica aumentou a hidrofobicidade dos filmes, mas, observou-se uma queda em ambas as propriedades com o aumento da concentração deste ácido. Por outro lado, o OM aumentou a estabilidade térmica, retardou a taxa de biodegradabilidade e diminuiu a taxa de transmissão à vapor d'água, mas o excesso de óleo provocou a separação de fases e migração para a superfície, o que prejudicou a hidrofobicidade. A partir dos resultados encontrados, concluiu-se que AT e o OM são aditivos promissores para o amido termoplástico, mas que a mistura dos aditivos não apresentou um efeito sinérgico.

Palavras-chave: Ácido Tartárico. Aditivo. Amido Termoplástico. Plastificante. Óleo de Mamona.

ABSTRACT

The widespread use of fossil-based plastics has raised significant concerns regarding sustainability and environmental waste accumulation, particularly concerning single-use plastics. From this perspective, biodegradable polymers emerge as potential alternatives. Among these, thermoplastic starch (TPS) stands out as a viable candidate; however, it exhibits inherent limitations, such as mechanical fragility, structural instability, and high moisture sensitivity. The present study aimed to develop TPS films and evaluate the potential of tartaric acid (TA) and castor oil (CO) at varying concentrations to overcome these limitations. The methodology involved the preparation of glycerol-plasticized TPS films incorporating TA and CO at concentrations of 5% and 15%, as well as a mixed formulation containing 7.5% of each. The mechanical, thermal, structural, surface, and barrier properties, alongside the biodegradability of the films, were evaluated. The results indicated that the efficacy of the additives depends on their concentration. Both additives acted as crosslinking agents, forming ester bonds with the starch matrix, with a higher degree of esterification observed in the TA incorporated samples. The addition of TA improved the mechanical rigidity and increased the hydrophobicity of the films. However, a decline in both properties was observed at higher concentrations of this acid. Conversely, CO enhanced thermal stability, delayed the biodegradation rate, and reduced the water vapor transmission rate. Nevertheless, excess oil induced phase separation and surface migration, which compromised hydrophobicity. Based on these findings, it was concluded that TA and CO are promising additives for thermoplastic starch, though their combined formulation did not demonstrate a synergistic effect.

Keywords: Additive. Castor Oil. Plasticizer. Tartaric Acid. Thermoplastic Starch.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre bioplásticos e plásticos convencionais 15
Figura 2 – Consumo de plástico por país 16
Figura 3 – Geração e descarte cumulativos de resíduos plásticos 18
Figura 4 – Ciclo de vida dos bioplásticos 18
Figura 5 – Mecanismo de biodegradação dos bioplásticos 19
Figura 6 – Capacidade global de produção de bioplásticos 20
Figura 7 – Capacidades globais de produção de bioplásticos 2025 vs 2030 por segmento 21
Figura 8 – Estruturas do amido 22
Figura 9 – Processo de obtenção do amido termoplástico 24
Figura 10 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície do amido granular e TPS 25
Figura 11 – Fases da obtenção de amido termoplástico influenciadas pela variação de temperatura e tempo de processamento 26
Figura 12 –Transição de fase do amido durante gelatinização e envelhecimento 27
Figura 13 – Estrutura do amido com e sem incorporação de plastificante 31
Figura 14 – Relação hierárquica entre a estrutura da matriz do polímero de amido e suas propriedades macroscópicas 32
Figura 15 – Estrutura do glicerol 34
Figura 16 – Interação entre amido–glicerol 34
Figura 17 – Estrutura do ácido tartárico 36
Figura 18 – Estrutura do componente principal do óleo de mamona (triricinoleína e ácido ricinoleico) 38
Figura 19 – Técnicas de processamento de materiais biodegradáveis à base de amido 40
Figura 20 – Técnica de *casting* 41
Figura 21 – Fluxograma do procedimento experimental 42
Figura 22 – Filmes de amido termoplástico 48
Figura 23 - Embranquecimento do filme de 15% AT 50
Figura 24 – Espectro de FTIR das amostras 51
Figura 25 – Espectro de FTIR de AT e 15% AT 53
Figura 26 – Reação de esterificação do amido 53
Figura 27 – Deconvolução da banda na região de 1800–1550 cm^{-1} 54
Figura 28 – Área relativa das bandas de deconvolução 55
Figura 29 – Curvas de DSC das amostras 56
Figura 30 – Curvas de TGA e DTG das amostras 58
Figura 31 – Mecanismo de degradação térmica do TPS 59
Figura 32 – Resultados de ângulo de contato 61
Figura 33 – Esquema da distribuição de lipídeos na matriz de amido termoplástico 63
Figura 34 – Biodegradação TPS 67
Figura 35 – Biodegradação 7,5% AT/OM 67
Figura 36 – Biodegradação 5% AT 68
Figura 37 – Biodegradação 15% AT 68
Figura 38 – Biodegradação 5% OM 68
Figura 39 – Biodegradação 15% OM 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do amido de milho.....23
Tabela 2 – Propriedades físicas do amido de milho 23
Tabela 3 – Classificação dos aditivos/plastificantes e respectivos exemplos.....33
Tabela 4 – Composição das misturas preparadas a partir de TPS, AT e OM 43
Tabela 5 – Rendimento qualitativo dos filmes de TPS.....49
Tabela 6 – Bandas identificadas nos espectros de FTIR 51
Tabela 7 – Resultados do ensaio de TGA/DTG.....58
Tabela 8 – Resultados do ensaio transmissão de vapor d'água 64
Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração 65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AT	Ácido Tartárico
CO_2	Dióxido de Carbono
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
GEE	Gases de Efeito Estufa
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por transformada de Fourier
LRT	Limite de Resistência à Tração
OM	Óleo de Mamona
T_g	Temperatura de Transição Vítrea
TGA	Análise Termogravimétrica
TPS	*Themoplastic Starch* (Amido Termoplástico)
WVT	*Water Vapor Transmission* (Taxa de Transmissão de Vapor d'água)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 OBJETIVOS 13
2.1 Objetivo geral 13
2.2 Objetivos específicos 13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
3.1 Polímeros biodegradáveis 14
3.1.2 Amido 21
3.1.3 Amido termoplástico 24
3.2 Plastificantes e aditivos empregados em formulações de TPS 29
3.2.1 Glicerol 34
3.2.2 Ácidos orgânicos 35
3.2.3 Óleos vegetais 37
3.2.4 Efeito sinérgico 39
3.3 Processamento de materiais biodegradáveis a base de amido 40
4 MATERIAIS E MÉTODOS 42
4.1 Visão geral 42
4.2 Materiais 42
4.3 Preparo dos filmes de amido termoplástico 43
4.4 Caracterizações 44
4.4.1 Aspecto visual e rendimento dos filmes 44
4.4.2 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier 44
4.4.3 Calorimetria exploratória diferencial 44
4.4.4 Análise termogravimétrica 44
4.4.5 Ângulo de contato 45
4.4.6 Taxa transmissão de vapor d'água 45
4.4.7 Ensaio de tração 46
4.4.8 Ensaio de biodegradabilidade 46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 48
5.1 Aspecto visual e rendimento dos filmes 48
5.2 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier 50
5.3 Calorimetria exploratória diferencial 55

5.4 Análise termogravimétrica 57
5.5 Ângulo de contato 61
5.6 Taxa transmissão de vapor d'água 63
5.7 Ensaio de tração 65
5.8 Ensaio de biodegradabilidade 67
6 CONCLUSÃO 70
REFERÊNCIAS 72

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos derivados do petróleo são materiais versáteis, duráveis e de baixo custo que estão massivamente presentes no dia a dia. De acordo com a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), "plástico", também denominado polímero, é um termo genérico usado no caso de material polimérico que pode conter outras substâncias para melhorar o desempenho e/ou reduzir custos. As propriedades do plástico, tais como baixa condutividade térmica e elétrica, resistência química e leveza justificam o seu uso em diversas áreas, principalmente em embalagens (PILAPITIYA; RATNAYAKE, 2024).

No entanto, o crescente aumento do uso e descarte de embalagens plásticas vem despertando preocupações ambientais devido a poluição e acúmulo desses resíduos no meio ambiente. A geração global estimada de resíduos plásticos entre 1950 e 2015 foi de cerca de 6,30 bilhões de toneladas, sendo que aproximadamente 80% de tais resíduos se acumularam no meio ambiente (PILAPITIYA; RATNAYAKE, 2024).

O ciclo de vida curto do plástico, principalmente representado por aqueles materiais de uso único, detém uma pegada de carbono significativa, contribuindo com 3,4% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE). Em 2019, os plásticos geraram um total de 1,8 gigatoneladas de emissões de GEE, sendo as etapas de produção e conversão do plástico a partir de combustíveis fósseis responsáveis por 90% dessas emissões (OECD, 2022).

Considerando este contexto, atualmente a substituição dos polímeros derivados de fontes não renováveis por polímeros derivados de fontes renováveis vem sendo amplamente estudada, a fim de atender a necessidade de reduzir o impacto negativo dos resíduos plásticos no meio ambiente e no efeito estufa. Nessa ótica, os polímeros biodegradáveis surgem como uma alternativa promissora, apresentando potencial de aplicação em diferentes setores industriais (JHA et al., 2024). Dentre esses materiais, o amido se destaca por ser o polissacarídeo digerível mais importante para a nutrição humana, bem como por sua grande relevância para diversas indústrias devido ao baixo custo, grande versatilidade e facilidade de uso. Ele é sintetizado por células vegetais e composto por dois polímeros, a amilose e a amilopectina (ALCÁZAR-ALAY; MEIRELES, 2015).

No entanto, o amido apresenta uma série de desvantagens. Ele é altamente hidrofílico, apresenta baixa capacidade de barreira ao vapor d'água. Além disso, é frágil, apresentando baixa resistência à tração, e suas propriedades dependem fortemente do teor de umidade (MULLER; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; CHIRALT, 2017). Como o amido não flui em sua forma nativa devido às fortes ligações de hidrogênio em sua estrutura, é necessário o uso de

plastificantes para transformá-lo em um material aplicável para a indústria de plásticos. O amido termoplástico (TPS - do Inglês *Thermoplastic Starch*) é um material produzido por meio da incorporação de plastificantes na cadeia do amido que são capazes de, sob ação de temperatura e/ou cisalhamento, quebrar as ligações intermoleculares a fim de produzir um polímero que destaca-se por sua flexibilidade e capacidade de formar filmes (MOHAMMED et al., 2022).

Diante desse cenário, a utilização de agentes plastificantes e/ou aditivos tem se mostrado uma estratégia eficiente para melhorar as propriedades da matriz polimérica e, consequentemente, otimizar as propriedades finais do material para o seu emprego na indústria. Dentre os diversos plastificantes e aditivos estudados na literatura, o ácido tartárico (AT) e o óleo de mamona (OM) ainda são pouco explorados, havendo poucos estudos investigando o papel predominante como plastificante ou agente de modificação química, bem como o comportamento quando ambos são misturados.

Diante disso, este trabalho propõe investigar o efeito da incorporação de ácido tartárico e óleo de mamona em diferentes proporções, bem como sua mistura nas propriedades de filmes de amido termoplástico. Para tanto, a metodologia consistiu na obtenção dos filmes de TPS por meio da técnica de *casting*. Os materiais resultantes foram então caracterizados quanto as suas propriedades mecânicas, térmicas, estruturais, de superfície, de barreira e biodegradabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência da mistura de diferentes concentrações de ácido tartárico e óleo de mamona nas propriedades de filmes de amido termoplástico.

2.2 Objetivos específicos

- Preparar filmes de TPS com diferentes quantidades de ácido tartárico e óleo de mamona;
- Avaliar a influência de diferentes formulações sobre o aspecto visual dos materiais obtidos;
- Caracterizar as propriedades mecânicas, térmicas, estruturais, de superfície, de barreira e biodegradabilidade dos filmes de TPS modificadas, correlacionando-as com a presença e proporção dos aditivos;
- Analisar o potencial do ácido tartárico e óleo de mamona como agentes plastificantes e/ou aditivos na fabricação de TPS.

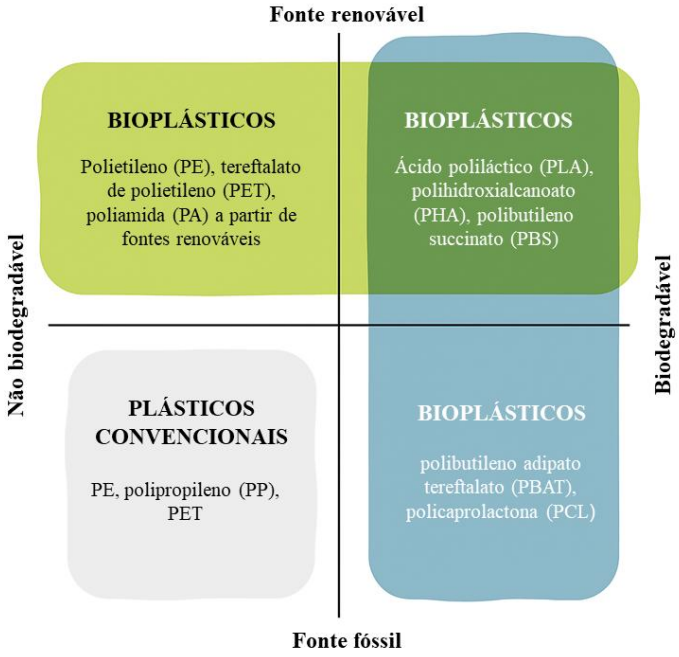
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Polímeros biodegradáveis

Os polímeros são macromoléculas formadas pela repetição de unidades estruturais menores, os meros, ligadas por meio de ligações químicas. Eles destacam-se por serem materiais leves, tenazes e com boa rigidez mecânica, além de apresentarem grande versatilidade de conformação e design. A combinação entre baixo custo de fabricação, elevada processabilidade e propriedades contribui para que esses materiais se tornem amplamente utilizados em produtos industriais e de consumo. Em relação ao comportamento mecânico, os polímeros podem ser classificados como termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os termoplásticos são polímeros que sob efeito de temperatura e/ou pressão plastificam e fluem, podendo ser moldados nestas condições e, após retirada da temperatura e pressão, adquirem a forma desejada. Os termofixos são conformáveis apenas no estágio intermediário de sua fabricação, pois após o processo de cura, no qual há a formação de ligações cruzadas, tornam-se duros, insolúveis e infusíveis. Por fim, os elastômeros, popularmente conhecidos como borrachas são polímeros que sofrem elevados graus de deformação, retornando a forma original após a remoção o esforço (PILAPITIYA; RATNAYAKE, 2024).

Em relação à origem, os polímeros podem ser classificados em naturais, quando obtidos diretamente de fontes biológicas (como polissacarídeos e proteínas) ou sintéticos, quando produzidos pelo homem. Os polímeros sintéticos ainda podem ser classificados em polímeros convencionais e biopolímeros. A classificação em convencionais e biopolímeros, segundo os critérios da *European Bioplastics*, que é amplamente adotada em diversos países, considera dois fatores fundamentais: a origem das matérias-primas utilizadas e o mecanismo de degradação do material. Assim, um polímero é enquadrado como biopolímero quando é produzido total ou parcialmente a partir de recursos renováveis, por exemplo, amido de milho, cana-de-açúcar ou celulose, não existindo uma porcentagem mínima de material proveniente da fonte renovável para classificá-los como tal. Cabe destacar que, nessa definição, a biodegradabilidade não é uma exigência obrigatória, podendo o material ser derivado de fonte biológica sem necessariamente se decompor por ação microbiana (JONES, 2020). A Figura 1 mostra como os plásticos são classificados com base na origem das matérias-primas (renovável ou fóssil) e na biodegradabilidade, bem como exemplos de polímeros para cada categoria.

Figura 1 – Comparação entre bioplásticos e plásticos convencionais



Fonte: Traduzido de JONES, 2020.

Os polímeros biodegradáveis de base biológica, popularmente chamados de bioplásticos biodegradáveis, são materiais que provêm, inteira ou parcialmente, da biomassa ou de produtos biológicos. Essas fontes renováveis podem incluir materiais de origem vegetal e animal. Por serem tanto renováveis quanto biodegradáveis, o desenvolvimento desses polímeros surge como uma alternativa ecológica aos plásticos derivados do petróleo (JHA et al., 2024).

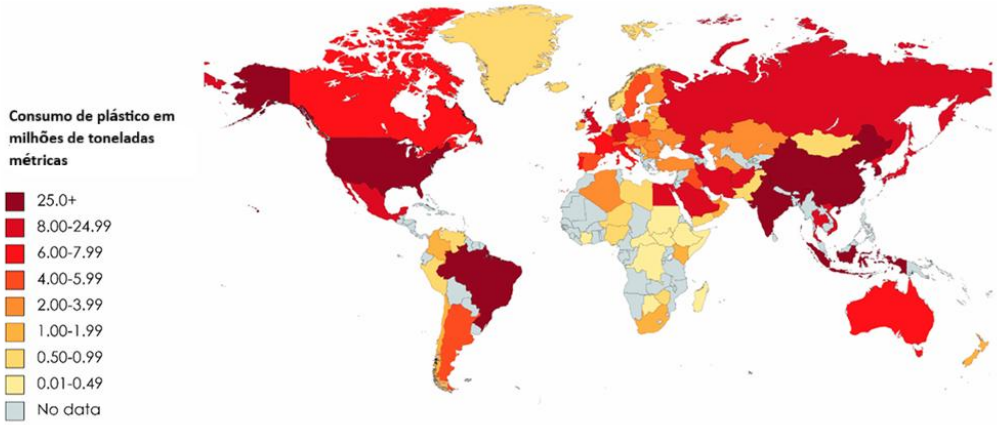
Por outro lado, os polímeros convencionais, ou simplesmente plásticos, são aqueles derivados de fontes não renováveis, oriundos do petróleo. Atualmente, 99% de todos os plásticos convencionais em uso são provenientes de combustíveis fosseis derivados do petróleo. Apesar de terem revolucionado o modo de vida da sociedade moderna, entende-se que os polímeros convencionais ainda apresentam perigo à vida humana e ao meio ambiente, uma vez que a produção em massa e o acúmulo de resíduos pós-consumo possuem impacto elevado ao meio ambiente (PESARANHAJIABBAS; MISRA; MOHANTY, 2023).

Dentre os mais diversos usos dos plásticos, cerca de 47% dos plásticos produzidos são aplicados ao setor de embalagens. Além disso, estimativas revelam que cerca de 36% do consumo de plástico do usuário final é representado por embalagens. Grande parte deste valor é oriundo da indústria de alimentos. Em 2019, por exemplo, esse valor representou 37,3 milhões de toneladas de plástico consumidas para embalagens de alimentos globalmente. Para fins comparativos com a produção de plástico total, em 2016 foram produzidas 330 milhões de toneladas métricas sendo ainda a produção estimada para dobrar dentro dos próximos 20 anos.

Esses dados são alarmantes, uma vez que cerca de 95% de todo o material de embalagem plástica é perdido após o seu primeiro e único ciclo de uso. Em termos financeiros, isso representa um desperdício de 80 a 120 bilhões de dólares por ano (WILLIAMS; RANGEL-BUITRAGO, 2022).

Com a crescente demanda de plásticos, principalmente no Brasil, um dos maiores consumidores desse material no mundo conforme ilustrado na Figura 2, os subsequentes impactos ambientais do uso de plásticos derivados do petróleo se tornam uma preocupação que desafia diretamente a necessidade de adotar práticas e materiais mais sustentáveis. Dentre as principais preocupações, destaca-se a contribuição massiva da produção e uso de plásticos nas emissões de carbono (JHA et al., 2024).

Figura 2 – Consumo de plástico por país



Fonte: Adaptado de JHA et al., 2024.

Em relação ao impacto climático causado pela produção massiva de plásticos, o relatório "Global Plastics Outlook" é uma referência fundamental. Segundo a publicação, o ciclo de vida completo dos plásticos gerou 1,8 gigatoneladas (Gt) de emissões de gases de efeito estufa em 2019, o que representou 3,4% do total global. O estudo detalha que o problema é sistêmico, apontando que 90% dessas emissões não vêm do descarte, mas sim das etapas iniciais de produção e conversão de matéria-prima fóssil (OECD, 2022).

Esses dados corroboram o estudo de Zheng e Suh de 2019, que aponta que as emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) equivalente ao longo do ciclo de vida dos plásticos convencionais foram de 1,7 Gt em 2015, com projeções de crescimento. Dentre as estratégias de mitigação de geração de GEE discutidas pelos autores, os plásticos de base biológica são opções muito interessantes, pois apresentam emissões de GEE ao longo do ciclo de vida mais baixas do que seus equivalentes à base de combustíveis fósseis. Estima-se que substituir 65,8%

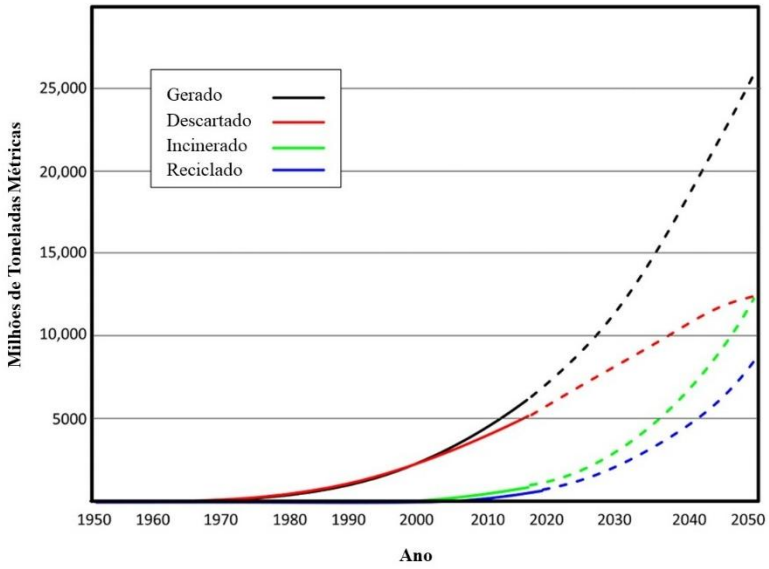
dos plásticos convencionais do mundo por plásticos de base biológica evitaria a emissão de 241 a 316 Mt de CO_2 equivalente por ano.

Além da contribuição significativa para o efeito estufa, os plásticos convencionais apresentam outro problema relevante: a poluição gerada pelo descarte inadequado deste material. Estima-se que, até 2050, o volume total de resíduos plásticos acumulados no planeta possa atingir aproximadamente 6,5 bilhões de toneladas métricas, sendo que, desde o início da produção em larga escala, cerca de 79% desse total foi destinado a aterros sanitários ou descartado de forma irregular no meio ambiente (PESARANHAJIABBAS; MISRA; MOHANTY, 2023).

Assim como os aterros sanitários, outras estratégias têm sido empregadas na tentativa de mitigar os impactos negativos dos resíduos plásticos, tais como a recuperação de energia por incineração e a reciclagem (mecânica e/ou química). Embora o aterramento seja uma das práticas mais antigas, ela vem sendo progressivamente reduzida devido à escassez de áreas disponíveis e ao risco de vazamento de substâncias tóxicas para lençóis freáticos. A incineração, por sua vez, permite o aproveitamento energético do plástico, mas essa técnica também apresenta desvantagens, por conta da emissão de gases poluentes. Já a reciclagem se apresenta como uma alternativa mais sustentável, embora ainda limitada, visto que o percentual de plásticos efetivamente reciclados é muito inferior à sua taxa de produção. (PESARANHAJIABBAS; MISRA; MOHANTY, 2023). No Brasil, em 2019, 838,5 mil toneladas de resina reciclada pós-consumo (do Inglês, PCR ou *Post-consumer Recycled Resin*) foi reciclada, o que representa uma taxa de reciclagem de apenas 24%. As resinas PCR são aquelas obtidas através do processo de reciclagem mecânica do plástico que já foi utilizado pelo consumidor (ABIPLAST, 2020).

Dessa forma, observa-se que o destino final dos plásticos convencionais continua sendo um dos principais desafios ambientais contemporâneos, especialmente devido à dificuldade de reinserção completa desses materiais no ciclo produtivo (JHA et al., 2024). A Figura 3 ilustra a geração e o descarte cumulativo de resíduos plásticos no mundo no período de 1950 até projeções para o ano de 2050 (representadas pelas linhas tracejadas). Os dados mostram uma projeção exponencial no total de resíduos plásticos gerados, com uma projeção de 26 bilhões de toneladas métricas produzidas até 2050 e com cerca de 50% desse valor simplesmente descartado. Ademais, a grande lacuna entre a quantidade de plásticos reciclados e produzidos evidencia uma ineficiência na gestão de resíduos.

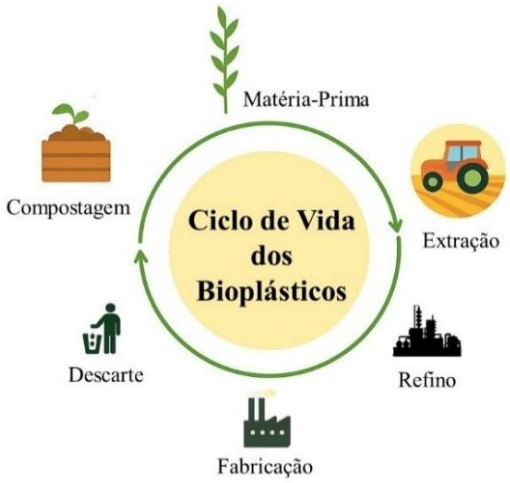
Figura 3 – Geração e descarte cumulativos de resíduos plásticos



Fonte: Traduzido de WILLIAMS; RANGEL-BUITRAGO, 2022.

Apesar da dificuldade de transição de polímeros convencionais para polímeros biodegradáveis de base biológica, os mesmos são uma alternativa amplamente investigada devido a sua contribuição à economia circular, uma vez que apresentam melhor gestão do fim de vida útil, que é feita, principalmente, por meio da compostagem, onde podem se decompor sob a ação de microorganismos, em compostos simples como água, CO_2 e biomassa (JHA et al., 2024). A Figura 4 apresenta resumidamente o ciclo de vida geral de bioplásticos biodegradáveis.

Figura 4 – Ciclo de vida dos bioplásticos

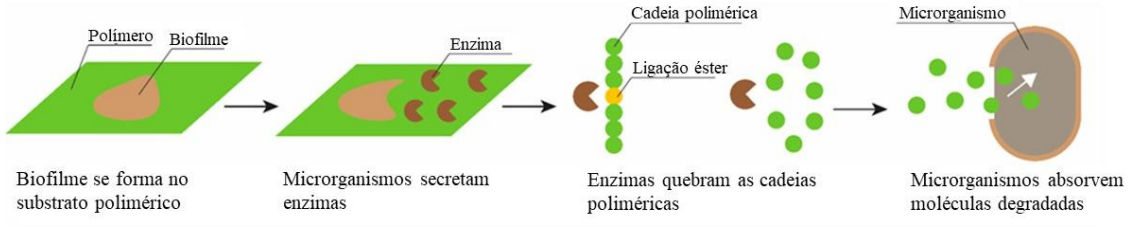


Fonte: Adaptado de JHA et al., 2024.

A compostagem desempenha um papel fundamental na gestão do fim de vida dos bioplásticos, sendo considerada uma alternativa de gerenciamento de resíduos mais sustentável, econômica e segura do que a reciclagem tradicional, a incineração ou o descarte em aterros sanitários. De acordo com a norma internacional ASTM D5338, um polímero é considerado compostável quando converte pelo menos 90% do seu teor de carbono em CO_2. Alguns exemplos de bioplásticos considerados compostáveis são amido termoplástico, polihidroxialcanoatos (PHAs) e poli(ácido lático) (PLA) (AHSAN et al., 2023).

De maneira simplificada, o mecanismo de biodegradação dos bioplásticos ocorre em quatro etapas sucessivas: (i) biodeterioração, (ii) despolimerização, (iii) bioassimilação e (iv) mineralização. Inicialmente, um biofilme microbiano se forma na superfície do material, provocando a fragmentação do polímero em cadeias menores (etapa de biodeterioração). Em seguida, na despolimerização, os microrganismos desse biofilme secretam enzimas extracelulares que atuam quebrando as cadeias do polímero em moléculas ainda menores, como oligômeros e monômeros. Na terceira etapa, bioassimilação, os microrganismos absorvem essas pequenas moléculas e produzem metabólitos primários e secundários. Por fim, na mineralização, esses metabólitos são totalmente convertidos e liberados no ambiente na forma de CO_2, compostos inorgânicos e biomassa (ZHAO; CORNISH; VODOVOTZ, 2020). A Figura 5 apresenta de forma esquemática o mecanismo de biodegradação dos bioplásticos.

Figura 5 – Mecanismo de biodegradação dos bioplásticos

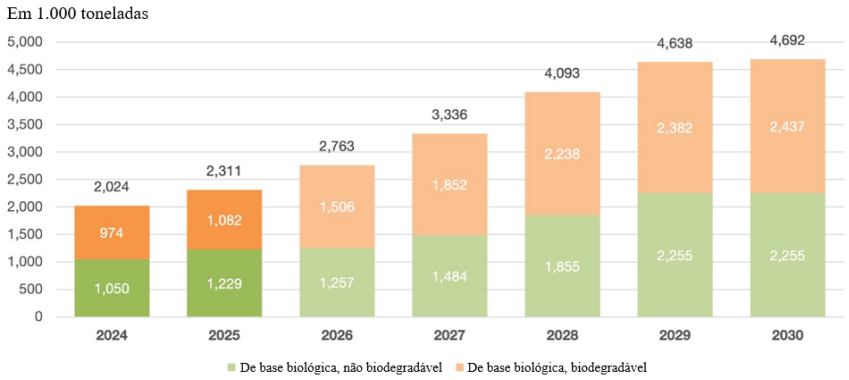


Fonte: Traduzido de ZHAO; CORNISH; VODOVOTZ, 2020.

O mercado de bioplásticos vem crescendo de forma expressiva no mundo. Segundo previsões reportadas pela *European Bioplastics* e *nova-Institute* (2025), a evolução das capacidades globais de produção de bioplásticos de base biológica entre 2024 e 2030 tem tendência de crescimento contínuo na produção total, passando de cerca de 2 milhões de toneladas em 2024 para aproximadamente 4,69 milhões de toneladas em 2030, o que representa um aumento superior a 100% no período, conforme apresentado na Figura 6. Esses dados sugerem um forte avanço da indústria de biopolímeros, em especial dos biodegradáveis, que

são impulsionados por políticas ambientais, inovação tecnológica e pela crescente demanda por materiais sustentáveis.

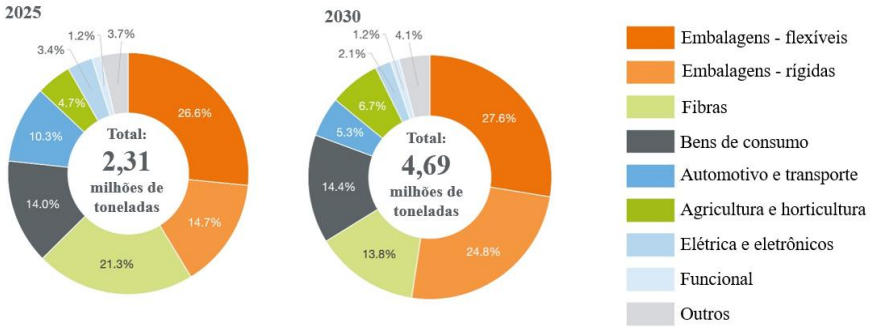
Figura 6 – Capacidade global de produção de bioplásticos



Fonte: Traduzido de EUROPEAN BIOPLASTICS; NOVA-INSTITUTE, 2025.

Para a aplicação dos bioplásticos, o padrão dos plásticos convencionais se repete. Também de acordo previsões reportadas pela *European Bioplastics* e *nova-Institute* (2025), 41,3% da capacidade global de produção de bioplásticos é destinada ao segmento embalagens flexíveis e rígidas. Ademais, a previsão para 2030 revela um aumento de 11,1% nesta capacidade, conforme mostrado na Figura 7. Ainda segundo o instituto, das 2,31 milhões de toneladas produzidas em 2025, 1,08 milhões representaram os bioplásticos biodegradáveis. Essa grande destinação para o segmento é suportada, principalmente, pelas diferentes possibilidades de bioplásticos existentes. Os materiais de base biológica e não biodegradáveis (como o bio-PET e o bio-PE) dominam o setor de embalagens rígidas, sendo essenciais na fabricação de garrafas. Em contrapartida, as alternativas biodegradáveis, como o poliácido láctico (PLA) e o amido termoplástico, são as principais matérias-primas para a produção de embalagens flexíveis, como filmes protetores e sacolas (ZHAO; CORNISH; VODOVOTZ, 2020).

Figura 7 – Capacidades globais de produção de bioplásticos 2025 vs 2030 por segmento



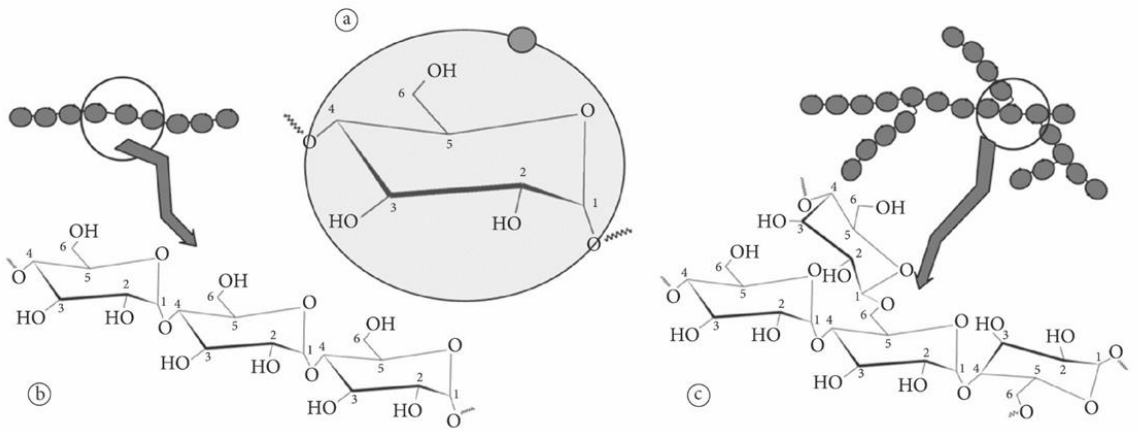
Fonte: Adaptado de EUROPEAN BIOPLASTICS; NOVA-INSTITUTE, 2025.

Nesse cenário, o amido é um polímero que se destaca não apenas pela sua biodegradabilidade, mas também por sua abundância, baixo custo e capacidade de formar filmes, fatores que o posicionam como uma alternativa viável para a substituição de polímeros de fonte fóssil. No entanto, para que sua aplicação em larga escala seja efetiva, é necessário superar suas principais limitações (CHENG et al., 2021).

3.1.2 Amido

O amido, um dos biopolímeros mais abundantes da Terra (juntamente com a celulose e a lignina), é um polissacarídeo de origem vegetal que se destaca por ser biodegradável e biocompatível. Ele é composto por várias unidades de glicose unidas por ligações glicosídicas e pode ser encontrado em proporções significativas em cereais, tubérculos e leguminosas. Em sua forma nativa, o amido é constituído por dois componentes macromoleculares principais: a amilose e a amilopectina. A amilose apresenta uma estrutura quase linear constituída por unidades de glicose interconectadas por meio de ligações glicosídica α-1,4, enquanto a amilopectina é um polímero de estrutura altamente ramificada, formado por cadeias curtas conectadas por pontos de ramificação que ocorrem a cada 25–30 unidades de glicose. A Figura 8 apresenta a estrutura molecular da glicose, amilose e amilopectina e suas ligações glicosídicas. A quantidade de amilose e amilopectina no amido pode variar dependendo da fonte vegetal. Em relação ao amido de milho, mais especificamente, geralmente o seu conteúdo de amilose e amilopectina é, respectivamente, 28% e 72% (MULLER; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; CHIRALT, 2017).

Figura 8 – Estruturas do amido



(a) unidade de glicose; (b) amilose; (c) amilopectina.
Fonte: ALCÁZAR-ALAY; MEIRELES, 2015.

O amido é amplamente aplicado no setor de embalagens, sendo considerado um substituto ecologicamente correto e viável para produtos de embalagem de uso único à base de petróleo. Este biopolímero é valorizado na indústria devido a sua capacidade de formação de filmes, baixo custo e adequação para contato com alimentos. As aplicações são limitadas, geralmente encontradas na forma de blendas ou de compósitos, cuja processabilidade e propriedades são comparáveis às dos polímeros convencionais. Apesar disso, o amido é uma boa alternativa para certos polímeros termoplásticos sintéticos. Ainda em relação às aplicações, pode-se dividi-las em três categorias principais: (i) filmes e revestimentos, que são ideais para a indústria de embalagens de produtos alimentícios devido à sua transparência e boas propriedades de barreira contra gases; (ii) espumas, que são usadas em aplicações de embalagem e servem como uma excelente alternativa à espuma de poliestireno, incluindo bandejas de frutas e espuma de amortecimento; e (iii) produtos termoformados, resultantes da termoformagem de produtos, como bandejas de refeição/carne, bandejas de café, bandejas de biscoitos e bandejas de chocolate (SURENDREN et al., 2022).

Existem diversas fontes para o amido, dentre elas, o amido de milho se destaca. De acordo a pesquisa de Oliveira et al. (2026) que teve como objetivo revisar a literatura científica entre 2019 e 2024 sobre misturas de polímeros biodegradáveis à base de amido voltadas para embalagens de alimentos e foco em termoestabilidade, o amido de milho é o tipo de amido mais amplamente utilizado na pesquisa e no desenvolvimento de bioplásticos (representando 32,9% do uso entre as fontes de amido). Outras fontes de amido utilizadas incluem mandioca (19,3%) e batata (10,9%). Da parcela de amido de milho, o Brasil detém 8,3% dos estudos, posicionando-se em terceiro lugar no ranking de países com estudos referentes a este tipo de

amido. Isto acontece, principalmente, pelo fato do amido, no geral, ser um recurso altamente disponível, cultivado em larga escala, com destaque para aqueles países que são grandes produtores e exportadores agrícolas. Logo, a utilização de amidos locais, como o de milho, alinha-se aos princípios da bioeconomia, circularidade e sustentabilidade.

Para compreender o potencial do amido de milho como matriz polimérica na produção de bioplásticos, é necessário analisar suas características intrínsecas. As propriedades do grânulo, estrutura microscópica produzida pelas plantas a partir da polimerização da glicose gerada na fotossíntese, principalmente a sua proporção entre amilose e amilopectina, afetam diretamente o seu comportamento sob stress e calor (OJOGBO; OGUNSONA; MEKONNEN, 2020). A Tabela 1 detalha a composição química enquanto a Tabela 2 detalha as principais propriedades físicas do amido de milho em seu estado natural.

Tabela 1 – Composição química do amido de milho

Conteúdo	Quantidade
Amilose	24,64 – 29,4 g/100 g
Amilopectina	72 – 75,36 g/100 g
Proteínas brutas	0,38 – 7,70 g/100 g
Gorduras brutas	0,32 – 7,13 g/100 g
Cinzas	0,32 – 0,62 g/100 g
Fósforo	0,09 %
Teor de umidade	10,45 – 10,82 %

Fonte: Adaptado de MOHAMMED et al., 2022.

Tabela 2 – Propriedades físicas do amido de milho

Propriedade	Valor
Densidade	1,356 – 1,403 g/cm³
Ponto de Fusão	256 – 258 °C
Permeabilidade ao vapor d'água	7 – 8 g·mm m^{-2} d^{-1} kPa^{-1}
Permeabilidade ao oxigênio em filme	12,11 cm^3 µm·m^{-2} d^{-1} kPa^{-1}
Degradação térmica em filme	161,2 °C

Fonte: Adaptado de MOHAMMED et al., 2022.

Apesar de materiais à base de amido oferecerem boas propriedades de barreira contra gases como oxigênio (O_2) e CO_2, o amido é altamente hidrofílico, o que leva a alta sensibilidade e solubilidade em água e baixa capacidade de barreira ao vapor d'água. Além disso, é um material frágil, apresentando baixa resistência à tração, e suas propriedades dependem fortemente do teor de umidade. Suas propriedades são instáveis devido à retrogradação, em

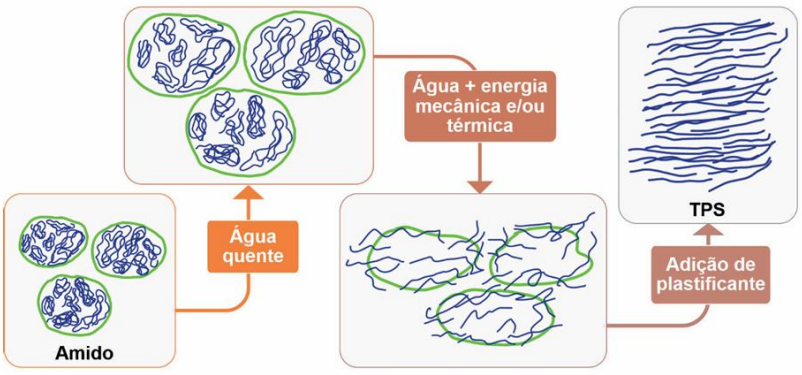
outras palavras, devido à reorganização e recristalização das cadeias do amido ao longo do tempo. Além disso, a processabilidade do amido é dificultada pela presença de fortes interações intermoleculares do tipo ligações de hidrogênio (MULLER; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ; CHIRALT, 2017; SURENDREN et al., 2022).

Como o amido não flui, é necessário o uso de plastificantes para transformá-lo em um material aplicável para a indústria de plásticos. Plastificantes são largamente utilizados na literatura com o objetivo de penetrar nos grânulos de amido e quebrar/reduzir as fortes interações das ligações de hidrogênio, transformando-o em um material termoplástico (MOHAMMED et al., 2022).

3.1.3 Amido termoplástico

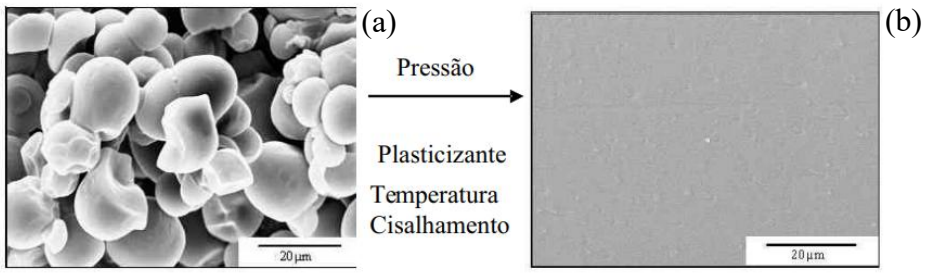
A conversão do amido nativo em um material termoplástico, conhecido como amido termoplástico (TPS - do Inglês Thermoplastic Starch), é uma solução viável para superar algumas das suas limitações. Tal conversão é alcançada pela incorporação de certos compostos chamados de agentes plastificantes, como água, glicerol, sorbitol e xilitol sob ação de temperatura e/ou cisalhamento (MALAFATTI et al., 2021). A Figura 9 apresenta de forma esquemática a obtenção do TPS. O mecanismo de ação desses aditivos envolve a redução das forças intermoleculares entre os grânulos, o que proporciona um aumento na mobilidade das cadeias poliméricas e resulta em uma fase contínua, conforme apresenta a Figura 10 (CORRADINI et al., 2007). O ciclo de transformação física e térmica do amido natural para amido termoplástico, quando submetido ao calor e ao tempo, divide-se em três fases: gelatinização, formação de pasta e retrogradação (HORSTMANN; LYNCH; ARENDT, 2017).

Figura 9 – Processo de obtenção do amido termoplástico



Fonte: MALAFATTI et al., 2021.

Figura 10 – Microscopia eletrônica de varredura da superfície do amido granular e TPS

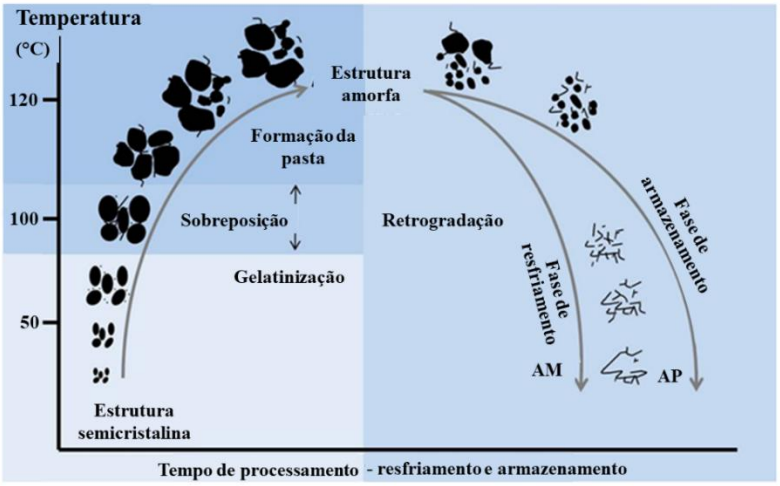


(a) amido granular; (b) TPS.
Fonte: CORRADINI et al., 2007.

Na obtenção de TPS, o plastificante é adicionado na etapa de gelatinização do processamento. Nesta fase ocorre a quebra das ligações de hidrogênio entre as cadeias poliméricas e a perda da organização original do amido mediante o fornecimento de energia mecânica e/ou térmica, geralmente em uma faixa de temperatura entre 90 °C e 180 °C, e a ação de plastificantes. Assim, ocorre uma expansão da região amorfa que exerce força sobre a região cristalina, levando ao colapso dos grânulos e inchamento do amido. O processo provoca um aumento na viscosidade do material, transformando a mistura em amido termoplástico (MALAFATTI et al., 2021).

Com a continuidade do aquecimento (ou aplicação de força física/cisalhamento) na etapa de formação da pasta, os grânulos atingem o inchaço máximo e acabam se rompendo totalmente, formando uma estrutura amorfa e dispersa composta de amilose, amilopectina e fragmentos dos grânulos (HORSTMANN; LYNCH; ARENDT, 2017). Após esse processamento, durante o resfriamento e com o passar do tempo, o TPS está sujeito à retrogradação, um fenômeno onde as cadeias de amilose e amilopectina se reorganizam e recristalizam, alterando progressivamente as propriedades do material, como o aumento da cristalinidade e modificações na resistência mecânica (MALAFATTI et al., 2021). A Figura 11 apresenta as fases de gelatinização, formação de pasta e retrogradação do amido influenciadas pela variação de temperatura e tempo de processamento. AM representa a recristalização da amilose e AP da amilopectina.

Figura 11 – Fases da obtenção de amido termoplástico influenciadas pela variação de temperatura e tempo de processamento

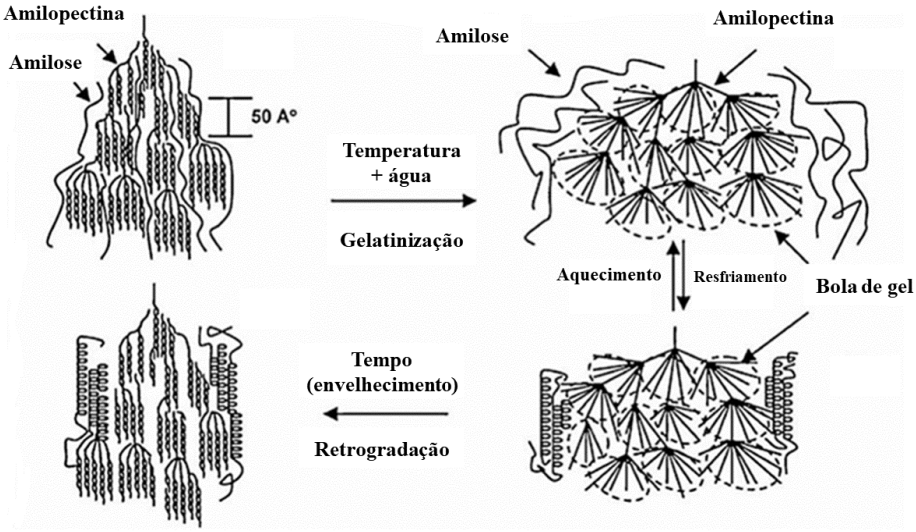


Fonte: Traduzido de HORSTMANN; LYNCH; ARENDT, 2017.

Durante a fase de resfriamento, que ocorre em curto prazo, o material para de ser submetido ao calor e sua temperatura começa a cair. Este é um processo rápido, que dura de minutos a algumas horas, onde as cadeias de amilose se recristalizam, o material perde fluidez e ganha uma estrutura sólida inicial (com aparência de um gel). Por outro lado, a fase de armazenamento, que ocorre no longo prazo, é um processo muito mais lento, que pode levar meses, sendo caracterizado, principalmente, pela recristalização gradativa da amilopectina. Isso causa um enrijecimento progressivo do material com o passar do tempo (HORSTMANN; LYNCH; ARENDT, 2017).

No que diz respeito à estrutura do amido, a recristalização provoca mudanças estruturais relevantes às propriedades do polímero. Inicialmente, tem-se a amilose, com sua cadeia linear, e a amilopectina, com cadeias curtas e ramificadas que formam uma estrutura cristalina em dupla hélice. Durante o processamento para formação de amido termoplástico, a dupla hélice da amilopectina é rasgada, convertendo-se em um gel amorfo processável caracterizado pela formação de "bolas de gel" a partir de suas ramificações curtas. Posteriormente, durante a fase de retrogradação, essas cadeias poliméricas buscam se reorganizar fisicamente para recristalizar. Esse fenômeno tem início quando a amilose forma cristais de hélice dupla, conhecida como Tipo B. Por outro lado, a amilopectina gelatinizada permanece em um estado inicial amorfo, mas, à medida que o tempo passa, suas ramificações passam a se reorganizar e contribuem de forma majoritária para o aumento progressivo da cristalinidade da estrutura de amilose (JIANG et al., 2020). A Figura 12 ilustra de forma esquemática a transição de fase do amido durante gelatinização e envelhecimento.

Figura 12 –Transição de fase do amido durante gelatinização e envelhecimento



Fonte: Traduzido de JIANG et al., 2020.

A duração e a intensidade desse processo de envelhecimento dependem diretamente da proporção de amilose e amilopectina existentes no amido utilizado, dentre outros aspectos. O estudo de Han et al., (2023) investigou o impacto da proporção amilose/amilopectina em espumas à base de amido no comportamento de formação da espuma, propriedades mecânicas e desempenho de isolamento térmico. Para tanto, foram fabricadas espumas com proporções diferentes, misturando amido de milho ceroso (rico em amilopectina) e amido de milho com alto teor de amilose. Os resultados revelaram que a amilose governa predominantemente o processo de retrogradação, visto que suas cadeias se reorganizam para formar duplas hélices e cristalitos (domínios cristalinos) muito rapidamente, ao passo que a amilopectina retrograda de forma consideravelmente mais lenta. Logo, as espumas compostas por uma maior proporção de amilose apresentaram forte retrogradação, o que elevou a cristalinidade da espuma final para até 25%, promovendo uma matriz de alta viscosidade, maior densidade e alta resistência mecânica à flexão. Em contrapartida, ao aumentar significativamente a proporção de amilopectina, a retrogradação da espuma foi minimizada, diminuindo o grau de cristalinidade para 5%, o que gerou uma matriz mais bem gelatinizada com maior porosidade e melhor desempenho de isolamento térmico.

Adicionalmente, o estudo de Liu et al. (2017) corrobora o impacto da proporção de amilose/amilopectina e ilustra também como a adição de inibidores químicos influenciam a retrogradação. Foi investigado o efeito da adição de baixas concentrações de procianidinas oligoméricas (polifenóis naturais) na retrogradação de três variações de amido, com alto teor de amilose (79,05%), amido normal (concentração de amilose de 25,43%) e sem nenhuma

amilose (0%), durante o estoque. Os resultados mostraram que o amido contendo maior proporção de amilose interagiu de forma mais forte com o aumento da concentração do inibidor adicionado, reduzindo a cristalização de 19,40% para 14,37%. Isso mostra que a molécula de inibidor interagiu com a amilose de tal forma a impedir que ela formasse estruturas de dupla hélice durante o envelhecimento, atrasando a recristalização devido à formação de ligações de hidrogênio intermoleculares entre os grupos hidroxila da molécula e das cadeias de amido.

Durante a gelatinização do amido, diversos fatores podem influenciar a formação do amido termoplástico. Dentre eles, a depender do método de produção utilizado, a presença de água é indispensável para a obtenção desse material. A água facilita o desenrolamento das duplas hélices e aumenta a sua mobilidade, o que permite o inchaço dos grânulos de amido e proporciona um espaço maior para a movimentação das cadeias. Além disso, a quantidade de água afeta diretamente o processo de retrogradação. Um teor de água muito baixo pode levar a uma gelatinização incompleta, impedindo a dissolução completa da amilose e a expansão dos núcleos cristalinos, mantendo-os após a gelatinização. Por outro lado, uma quantidade excessiva de água dificulta a interação dos grupos hidroxila por meio de pontes de hidrogênio devido ao grande afastamento das cadeias de amido, o que acaba reduzindo a recristalização do material (CHANG et al., 2021).

O estudo de Yang et al., (2024) avaliou o impacto da umidade na plastificação e nas propriedades do amido termoplástico. Para tanto, diferentes teores de água variando de 8% a 14% em relação à massa do amido seco foram investigados no TPS plastificado com glicerol. Os autores construíram um modelo computacional do sistema glicerol/amido/água e submeteram o material à ensaios de caracterização. Os resultados mostraram que o coeficiente de difusão do glicerol aumenta à medida que a água sobe de 8% para 11%, uma vez que esse aumento diminui a restrição do movimento do plastificante dentro do amido e estabiliza-se em teores superiores devido à expansão completa das cadeias poliméricas. Além disso, observou-se que o aumento do teor de água resultou na queda contínua da temperatura de transição vítrea (T_g), na tendência de diminuição do grau de cristalinidade do material e também na redução da resistência à tração e no aumento no alongamento na ruptura. O estudo concluiu que a água é substância fundamental para facilitar a penetração e dispersão do glicerol, sendo o teor de água de 12% considerado o balanço ótimo entre o ganho de fluidez para a estabilidade do processamento em extrusora e a preservação do desempenho mecânico do bioplástico.

Além da água, outros compostos, tais como ácido acético, são adicionados durante a obtenção do amido termoplástico a fim de auxiliar na modificação estrutural do amido, preparando-o para a plastificação durante a formação do gel. A adição de ácido acético em altas

temperaturas (cerca de 80 °C) provoca a hidrólise ácida dos grânulos de amido, quebrando-os parcialmente e, por conseguinte, diminuindo seu tamanho molecular. O ácido acético interage com o amido por meio de ligações de hidrogênio de tal forma a destruir parcialmente a estrutura cristalina do grânulo, reduzindo o tamanho molecular do amido e assim gerando um aumento nas regiões amorfas. Isso permite uma melhor dispersão e uma integração mais uniforme de agentes plastificantes dentro da matriz estrutural, aumentando a flexibilidade do filme resultante (POOJA et al., 2024a).

No estudo conduzido por Romeira et al. (2021), os autores utilizaram o ácido acético em conjunto com o glicerol na formação de biofilmes de amido proveniente da água de lavagem do processamento industrial de batatas por meio da técnica de *casting*. Nesse processo, além da água, o ácido acético em concentração de 4% (m/v), são adicionados à dispersão formadora durante a obtenção do amido termoplástico. A adição de ácido acético foi feita em altas temperaturas (80 °C por 10 minutos). Conforme evidenciado pela análise de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), o ácido acético interage com o amido e glicerol puramente por meio de ligações de hidrogênio, sem gerar reticulações cruzadas irreversíveis e mantendo sua integridade química. Além disso, o ácido em conjunto com a temperatura também atuou como um agente sanitizante eliminado os microrganismos presentes na água residual. Logo, este estudo evidencia os benefícios da presença de aditivos como ácido acético na fabricação de TPS.

A capacidade de interferir na organização das cadeias de amilose e amilopectina por meio de interações intermoleculares não se restringe apenas ao uso de aditivos ou inibidores, mas constitui o princípio fundamental da própria transformação de amido em amido termoplástico. A introdução de agentes plastificantes na matriz polimérica visa justamente substituir as fortes ligações de hidrogênio entre as cadeias de amido por novas interações entre o polímero e o plastificante. Esse processo é o que garante a estabilidade do estado amorfo gerado na gelatinização, impedindo o retorno imediato à estrutura cristalina rígida e conferindo ao material a flexibilidade necessária para o processamento industrial (MONTILLA-BUITRAGO et al., 2021).

3.2 Plastificantes e aditivos empregados em formulações de TPS

O fenômeno da plastificação pode ser entendido, em termos gerais, como o processo de aumentar a distância entre as cadeias de um polímero. Isso resulta diretamente em dois eventos: na redução das interações físicas entre essas cadeias e, consequentemente, no aumento da

mobilidade delas. Para que isso ocorra, plastificantes, que geralmente são compostos de baixa massa molar, são inseridos no espaço intermolecular, forçando o afastamento das cadeias poliméricas (ANDRZEJEWSKI et al., 2024). Ademais, os plastificantes ainda podem se dividir entre internos e externos. A plastificação interna ocorre quando há mudança na estrutura química, com a formação de ligações covalentes. A plastificação externa ocorre quando a adição do agente plastificante não resulta em novas ligações, interagindo de forma não covalente com o polímero (GLASER et al., 2026; MORENO-BOHORQUEZ; ARIAS-TAPIA; JARAMILLO, 2026).

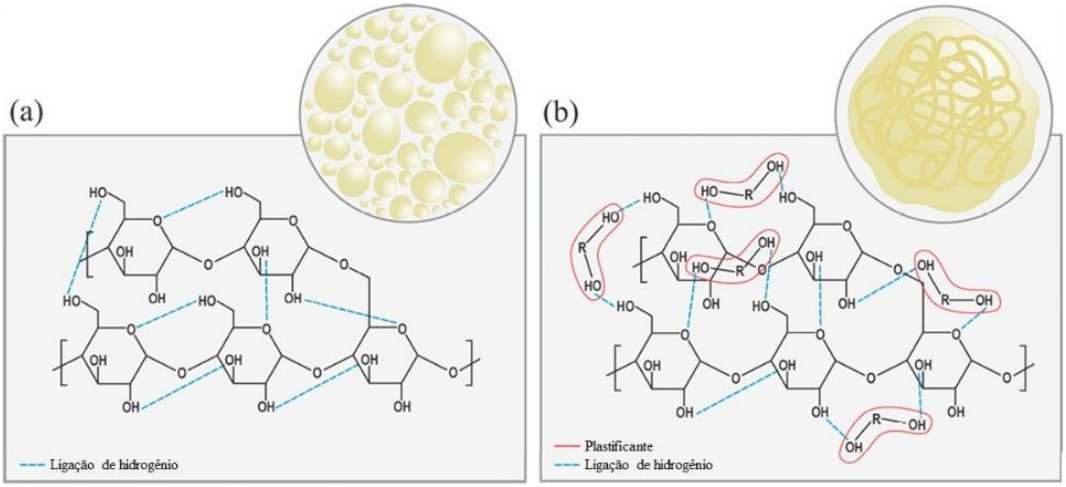
Dentre as alterações nas propriedades dos materiais, a eficiência de um plastificante é, principalmente, avaliada pela sua capacidade de reduzir a T_g do polímero. Desta forma, quanto maior a queda na T_g para uma mesma proporção de plastificante, mais eficiente ele é considerado. Essa redução é crítica, pois a T_g é uma transição térmica de segunda ordem onde o material deixa seu estado rígido (vítreo) para assumir um comportamento flexível e borrachoso, impulsionado pelo aumento da mobilidade segmental das cadeias. O desempenho desse processo depende diretamente da taxa de difusão do plastificante na matriz polimérica, ou seja, taxas de difusão mais altas geralmente levam a maiores eficiências. No entanto, isso apresenta um desafio técnico, visto que moléculas pequenas com alta mobilidade e eficiência tendem a apresentar maior volatilidade, podendo ser removidas do material plastificado mais rapidamente (MAZIDI; AREZOUMAND; ZARE, 2024).

O processamento do amido termoplástico é essencial para que o amido possa ser utilizado como um substituto viável para polímeros derivados do petróleo, uma vez que, embora o amido possua propriedades termomecânicas razoáveis, a plastificação é necessária para viabilizar métodos de produção em massa mais eficientes, como a extrusão ou *cast-extrusion*, sob pressão e temperatura controladas, em vez do menos eficiente método de *casting*, devido às fortes interações inter e intramoleculares presentes em sua estrutura. A importância fundamental do processamento reside realmente no uso de plastificantes, que são adicionados para regular as propriedades mecânicas do bioplástico, como a elasticidade e a fragilidade, e para manter a estrutura do material. Além disso, a adição de plastificantes influencia a transparência, durabilidade, tenacidade e propriedades térmicas do plástico, permitindo que o TPS atinja o desempenho exigido, como resistência à tração e flexibilidade, comparável a polímeros convencionais (RAHARDIYAN et al., 2023).

No caso do amido, a adição de plastificante reduz as forças intermoleculares e quebra grande parte das ligações de hidrogênio entre os grãos de amido nativo, formando novas ligações do tipo amido-plastificante para formar um TPS de estrutura amorfa conforme

ilustrado na Figura 13 (MORENO-BOHORQUEZ; ARIAS-TAPIA; JARAMILLO, 2026). Logo, a formação de ligações de hidrogênio entre o amido e o plastificante é o que determina, de maneira geral, a capacidade do agente em plastificar o amido (GLASER et al., 2026).

Figura 13 – Estrutura do amido com e sem incorporação de plastificante



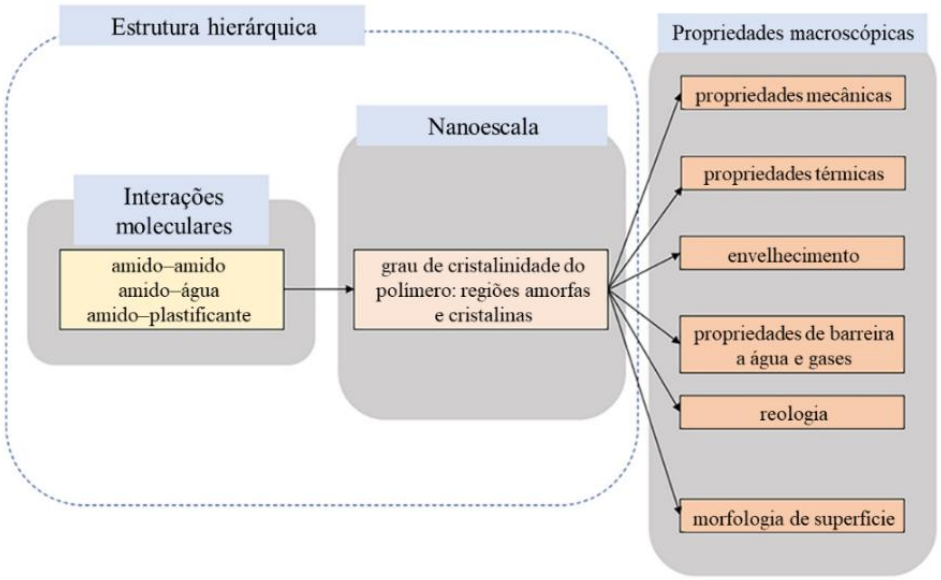
(a) estrutura do amido sem plastificante; (b) estrutura do amido com plastificante.

Fonte: Traduzido de MORENO-BOHORQUEZ; ARIAS-TAPIA; JARAMILLO, 2026.

No entanto, é necessário fazer a distinção entre aditivo e plastificante. Um aditivo é qualquer substância química incorporada à matriz do amido para qualquer propósito, por exemplo, aumentar o caráter hidrofóbico ou conferir ação antimicrobiana. Em contraste, um plastificante é um tipo específico de aditivo cuja função principal é interagir com o polímero para melhorar suas propriedades mecânicas a fim de permitir a sua produção e substituição por plásticos convencionais (GLASER et al., 2026).

Nesse contexto, o plastificante assume grande importância, uma vez que as interações intermoleculares que ele estabelece entre as cadeias de amido e a água rompem o empacotamento molecular original e, por sua vez, determinam a nanoestrutura do material, ou seja, o seu grau de cristalinidade e a formação das regiões amorfas. É essa modificação estrutural em nanoescala gerada pela presença do plastificante que altera as características macroscópicas do biopolímero, tais como propriedades mecânicas, térmicas, reológicas, o envelhecimento (retrogradação), a morfologia da superfície e a capacidade de barreira contra umidade e gases. A Figura 14 apresenta de forma esquemática a relação hierárquica direta entre a estrutura da matriz do polímero de amido e suas propriedades macroscópicas (GLASER et al., 2026).

Figura 14 – Relação hierárquica entre a estrutura da matriz do polímero de amido e suas propriedades macroscópicas



Fonte: Traduzido de GLASER et al., 2026.

No que diz respeito as propriedades, mecanicamente observa-se a redução da rigidez e o aumento da mobilidade das cadeias, refletido na flexibilidade e no alongamento na ruptura. Termicamente, os plastificantes expandem o volume livre dentro do polímero, ocasionando a redução tanto da T_g quanto da temperatura de fusão (T_m). No que tange às propriedades de barreira, o uso de plastificantes frequentemente eleva a hidrofilicidade e a sensibilidade à umidade. Por fim, do ponto de vista morfológico e temporal, os materiais plastificados deixam de ser ásperos e quebradiços para apresentar uma superfície mais lisa e homogênea, ganhando também resistência ao envelhecimento, visto que os plastificantes ajudam a estabilizar a fase amorfa e reduzem a taxa de recristalização do amido (GLASER et al., 2026).

O principal objetivo do mecanismo de plastificação, então, é modificar o processamento, pois ao permitir que as cadeias deslizem mais facilmente, a cristalinidade e viscosidade do material é efetivamente reduzida. Por se tratar de uma interação tipicamente física, a eficácia do método só é aparente quando o teor do composto plastificante é relativamente alto, usualmente de 20% a 60% (ANDRZEJEWSKI et al., 2024). No entanto, o impacto final do plastificante depende de fatores como a origem e a estrutura do amido, o tipo e a quantidade de plastificante usado, e as condições de processamento (tempo, temperatura e cisalhamento mecânico) (VILLADIEGO et al., 2022).

O estudo de Glaser et al. (2026) compreendeu uma revisão completa sobre a interação do amido com aditivos e plastificantes externos focando em aplicações potenciais em

embalagens de alimentos. Para melhor elucidar o estudo da interação de plastificantes com o amido, os autores categorizam os plastificantes de acordo com sua classe química em poliol, sacarídeos (monossacarídeos, dissacarídeos e oligossacarídeos), amidas, aminas, ácidos, ésteres, sais e óleos. A Tabela 3 apresenta as categorias químicas de plastificantes/aditivos com seus respectivos exemplos para uso em bioplásticos à base de amido.

Tabela 3 – Classificação dos aditivos/plastificantes e respectivos exemplos

Classificação	Exemplos
Polióis	Glicerol, Sorbitol, Xilitol, Eritritol, Manitol, Maltitol, Etilenoglicol, Propilenoglicol, Polietilenoglicol (PEG)
Sacarídeos	Monossacarídeos: Glicose, Frutose, Manose, Xilose, Galactose Dissacarídeos e Oligossacarídeos: Sacarose, Maltose, Dextrinas
Aminas	Trietanolamina, Etanolamina
Amidas	Ureia, Formamida, Acetamida, Etilenobisformamida, N,N-bis(2-hidroxietil)formamida (BHF)
Ácidos	Ácido cítrico, Ácido esteárico, Ácido láurico.
Ésteres	Citrato de acetil tributila (ATBC), Diacetato de glicerol, Monoglicerídeo acetilado (AM)
Óleos e Ceras	Cera de abelha, Óleo de girassol, Óleo de palma epoxidado (EPO), Óleos essenciais (*Menta pulegium*)
Sais	Cloreto de cálcio, Cloreto de zinco, Cloreto de magnésio

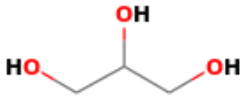
Fonte: Adaptado de GLASER et al., 2026.

Apesar dos benefícios técnicos, o uso de plastificantes convencionais de origem petroquímica enfrenta resistência devido a problemas de migração e toxicidade associada. Esse cenário impulsionou a demanda por "bioplastificantes" derivados de recursos agrícolas renováveis, como cereais, oleaginosas, frutas e resíduos vegetais, visando a produção de materiais plásticos integralmente biorenováveis. Para ser considerado uma alternativa "verde" ideal e substituir os aditivos tradicionais, o bioplastificante deve reunir características específicas, tais como, ser atóxico (assim como seus metabólitos), apresentar boa miscibilidade com o polímero base, manter a eficiência de plastificação, ter baixo custo e demonstrar alta resistência à lixiviação (permanência na matriz) (MAZIDI; AREZOUMAND; ZARE, 2024; SUN; WENG; ZHANG, 2024). Dentre os compostos que buscam atender a essas exigências, o glicerol destaca-se como o plastificante mais empregado no TPS.

3.2.1 Glicerol

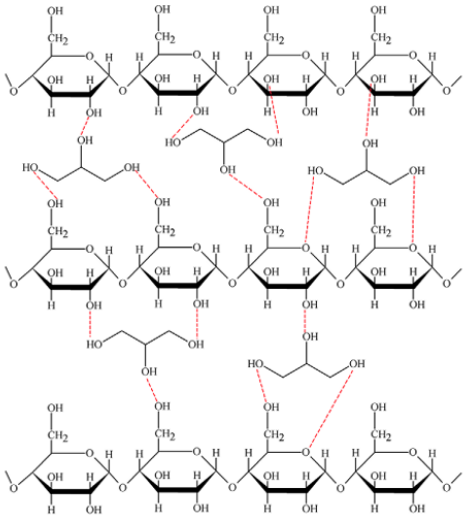
O glicerol, também conhecido como glicerina, é um álcool de fórmula molecular $C_3H_8O_3$, composto por 3 grupos hidroxila, conforme a Figura 15. Devido à sua termoestabilidade, alto ponto de ebulição e não toxicidade, o glicerol é o plastificante mais utilizado no TPS (RAHARDIYAN et al., 2023). A Figura 16 ilustra as ligações de hidrogênio que são formadas entre amido e glicerol no TPS.

Figura 15 – Estrutura do glicerol



Fonte: NIST CHEMISTRY WEBBOOK, [s.d.].

Figura 16 – Interação entre amido–glicerol



Fonte: MONTILLA-BUITRAGO et al., 2021.

Conforme discutido anteriormente, diversos fatores podem influenciar a interação entre o plastificante e o amido. Dentre esses fatores, o tipo de amido e a concentração de plastificante desempenham papéis importantes. A pesquisa de Tarique e colaboradores (2021) investigou o desenvolvimento de biofilmes de amido de araruta, o qual se destaca por possuir um alto teor de amilose de 40,86% e, portanto, formar filmes mais fortes. Para superar as limitações inerentes aos filmes de amido puro, tais como fragilidade e comportamento hidrofílico, o estudo empregou o glicerol como plastificante em diferentes concentrações de 15%, 30% e 45% (m/m) a fim de analisar o efeito da concentração do plastificante nas propriedades do filme frente ao

filme não plastificado. Os resultados revelaram que o filme de amido natural puro é rígido, frágil, ondulado, quebradiço e difícil de ser descolado da placa e manuseado. Em contraste, a adição do glicerol modificou o material, criando filmes mais flexíveis e homogêneos, sendo que a flexibilidade aumentou conforme o aumento da concentração de plastificante. Conforme destacado pelos autores, isso aconteceu devido a capacidade que o glicerol possui de deslizar nos espaços entre as moléculas dos polímeros, diminuindo a força das ligações de hidrogênio. O glicerol também provocou o aumento da espessura do biofilme (de 156 μm para até 233 μm), do teor de umidade (atingindo até 13,3%), da solubilidade em água (de 14,86% para 29,5%) e da permeabilidade ao vapor d'água. Por outro lado, a densidade e as taxas de absorção de água diminuíram conforme a concentração de glicerol aumentou. Nas propriedades mecânicas, a introdução do glicerol foi capaz de diminuir a resistência à tração (de 9,34 MPa para 1,95 MPa) e o módulo de elasticidade (de 620,79 MPa para 36,08 MPa). Em contrapartida, o alongamento na ruptura aumentou drasticamente, de 2,41% para 57,33%. Termicamente e estruturalmente, os filmes plastificados, em especial a concentração de 45%, exibiram melhor estabilidade térmica e maior homogeneidade microscópica quando comparados ao filme de amido de controle, evidenciando, assim o efeito do glicerol na matriz do biopolímero.

Apesar dos efeitos positivos, a aplicação de glicerol como único plastificante de amido beneficia a flexibilidade, mas prejudica a temperatura de fusão e a resistência à retrogradação dependendo da concentração. Essa perda de desempenho está ligada a duas características do glicerol: sua alta pressão de vapor, que o torna volátil e propenso a perdas no processamento, e sua estrutura molecular pequena, que limita a força das interações com as moléculas de amido (SURENDREN et al., 2022). Tendo isso em vista, a combinação de plastificantes e outros aditivos pode demostrar efeitos mais eficazes na plastificação deste polímero.

Diversos estudos têm explorado o uso de plastificantes e/ou aditivos de origem natural capazes de desempenhar múltiplas funções dentro de sistemas de TPS. Entre esses, o óleo de mamona (OM) e o ácido tartárico (AT) ainda são pouco estudados. Ambos são aplicados na modificação de polímeros biodegradáveis, mas cujos mecanismos de atuação podem variar conforme a formulação e as condições de processamento.

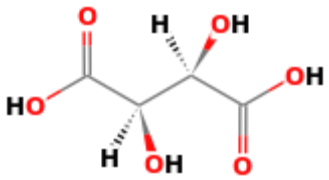
3.2.2 Ácidos orgânicos

De maneira geral, ácidos orgânicos são tratados como agentes de modificação química devido a sua capacidade de formação de ligações ésteres (esterificação). São empregados para modificar o amido, pois têm a capacidade de melhorar a processabilidade e flexibilidade, bem

como reduzir a cristalinidade e aumentar a hidrofobicidade (OJOGBO; OGUNSONA; MEKONNEN, 2020).

O ácido tartárico (AT) é um ácido dicarboxílico natural de fórmula molecular $C_4H_6O_6$ encontrado em vários vegetais e frutas, como maçã, banana e uva. Dentre as suas aplicações, é comumente usado como acidulante e substância auxiliar em alimentos e bebidas (JANNATIHA; SEDAGHAT; RAZAVI, 2025). Sua estrutura é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Estrutura do ácido tartárico



Fonte: NIST CHEMISTRY WEBBOOK, [s.d.].

De acordo com Olivato et al. (2013) ácidos orgânicos multifuncionais, tais como os ácidos cítrico, málico e tartárico, podem melhorar a compatibilidade entre fases poliméricas, produzindo misturas estruturalmente mais homogêneas e com melhores propriedades mecânicas. Além disso, esses ácidos são seguros para saúde humana, pois são atóxicos e não voláteis. No estudo, os autores avaliaram o efeito do AT nas propriedades de filmes de amido/poli(adipato-co-tereftalato de butileno) (PBAT) plastificados com glicerol. Foi verificado que a interação entre o amido/PBAT e AT tem um efeito positivo na resistência à tração e na força de perfuração. O mecanismo de compatibilização é baseado em reações de transesterificação e/ou reações de esterificação simples com hidroxilas do amido, formando um amido mais hidrofóbico, o que pode contribuir para a diminuição da permeabilidade ao vapor d'água.

O estudo de Santos et al. (2025) avaliou o efeito do uso dos ácidos cítrico, tartárico e succínico nas propriedades estruturais, mecânicas e térmicas do amido de mandioca termoplástico. Foram estudadas 4 composições (1%, 3%, 7% e 15%) em massa de amido para cada um dos ácidos. Os resultados de FTIR sugerem que a incorporação desses ácidos na matriz de amido ocorreu por esterificação e reticulação. Essa modificação química afetou as propriedades térmicas e mecânicas. Observou-se um aumento da estabilidade térmica com a incorporação dos ácidos orgânicos e a diminuição da rigidez em baixas concentrações de ácido. Em contrapartida, os autores pontuam um efeito plastificante dos ácidos à medida que a concentração dos mesmos aumenta, devido a obtenção de materiais mais flexíveis e fluidos. O

estudo conclui que essa abordagem é um caminho sustentável para expandir as aplicações industriais de polímeros biodegradáveis.

3.2.3 Óleos vegetais

Os óleos vegetais têm sido empregados em diversos estudos como opções eficientes de plastificação do amido, bem como alternativas para a formulação de materiais mais sustentáveis. Schlemmer e Sales (2010) mostram a viabilidade do uso de óleos de buriti, macaúba e pequi como plastificantes para o TPS de amido de mandioca acetilado. Os resultados comprovaram que os óleos são uma boa alternativa, uma vez que demonstraram bom efeito plastificante para o TPS. Os autores também concluem que a maior quantidade de ácidos graxos saturados favorece a difusão na matriz polimérica do amido acetilado. Logo, o óleo de pequi obteve o melhor resultado devido a maior quantidade de ácidos graxos saturados presentes na composição.

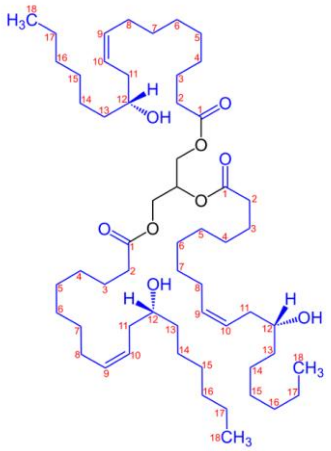
Em um estudo mais recente, Mojica-Muñoz et al. (2024) utilizam simulações computacionais para mostrar como o ácido oleico interage com a amilose do amido quando combinado com água, bem como o tamanho da cadeia de amido (6 e 18 unidades de glicose, respectivamente 6C e 18C) afeta a interação. O ácido oleico, um ácido graxo monoinsaturado simples, apresentou um coeficiente de difusividade consideravelmente baixo (0,18 e 0,28 × 10^{-5} cm^2/s a 363 K para 6C e 18C respectivamente) quando comparado ao amido plastificando somente com água (9,60 e 10,44 × 10^{-5} cm^2/s a 363 K, para 6C e 18C respectivamente) e plastificado com água-ácido oleico (9,99 e 10,52 × 10^{-5} cm^2/s a 363 K para 6C e 18C respectivamente), o que é uma propriedade excelente, pois evita que o plastificante migre para fora da matriz polimérica, prevenindo a perda precoce de flexibilidade. Apesar disso, o ácido oleico é majoritariamente apolar, o que dificulta a formação de ligações de hidrogênio com a amilose. No entanto, a falta de ligações de hidrogênio não se apresentou como um problema, uma vez que os resultados mecânicos indicam que sistemas com ácido oleico puro apresentaram melhores propriedades elásticas, comprovando o potencial do ácido graxo como plastificante do amido.

Adicionalmente, Volpe et al. (2018) exploraram a utilização de resíduos industriais ao aproveitar óleo de semente de girassol frito em substituição parcial do glicerol como plastificante ecológico no TPS, que foi posteriormente empregado como carga em matrizes de PLA como um material mais barato. Além dos resultados positivos da substituição nas propriedades mecânicas e térmicas, o diferencial da pesquisa é a avaliação do ciclo de vida das

formulações PLA/TPS. A análise demostrou que a introdução do óleo residual diminui os impactos ambientais em todas as 18 categorias de impacto analisadas, indicando que maior proporção de óleo frito em relação ao glicerol, amido (75%) + glicerol (15%) + óleo frito (10%), é a solução mais benéfica e ecologicamente adequada.

Outro óleo vegetal estudado na literatura é o óleo de mamona, também conhecido como óleo de rícino. Ele é proveniente da semente de *Ricinus communis* e é composto por ácidos graxos monossaturados, principalmente o ácido ricinoleico. A triricinoleína constitui o principal componente triglicerídeo do óleo. O OM é único porque contém um ácido ricinoleico especial, que possui uma cadeia de 18 carbonos com um grupo hidroxila no carbono 12 e uma dupla ligação cis entre os carbonos 9 e 10, conforme Figura 18 (DARIE-NIȚĂ et al., 2022). Devido à sua funcionalidade em grupos hidroxila e à presença de ácidos graxos de cadeia relativamente longa, pode atuar como plastificante, coplastificante ou aditivo, dependendo da sua interação com as fases poliméricas.

Figura 18 – Estrutura do componente principal do óleo de mamona (triricinoleína e ácido ricinoleico)



Fonte: DARIE-NIȚĂ et al., 2022.

Apesar dos benefícios da incorporação de óleos e ácidos orgânicos nas propriedades do TPS, ainda pode-se explorar o efeito sinérgico, onde a combinação desses aditivos exerce uma ação conjunta capaz de otimizar ainda mais o desempenho final do amido termoplástico.

3.2.4 Efeito sinérgico

Outro efeito interessante abordado na literatura é a sinergia de atuação de aditivos e plastificantes. Nesta abordagem, são empregados agentes que exercem ação combinada para a melhoria de diversas propriedades do amido termoplástico.

Em um estudo, Caicedo et al. (2019) avaliaram a utilização de concentrações de 0%, 3%, 6% e 9% em peso de ácido láctico e ácido oleico na modificação do amido de achira, plastificado com glicerol e sorbitol, a fim de melhorar a processabilidade do polímero. A análise reométrica demostrou que ambos os aditivos são eficientes na redução de energia necessária para misturar os materiais, sendo o ácido láctico extremamente mais eficaz, mas que concentrações acima de 6% não geraram mudanças significativas nas variáveis de processamento (torque, temperatura e energia). Já a análise de FTIR demonstrou que em comparação com as amostras apenas com plastificantes, os ácidos contribuíram para a formação de ligações de hidrogênio mais estáveis. A análise térmica demostrou que a estabilidade das formulações depende de qual plastificante foi utilizado, sendo que o sorbitol obteve melhores resultados com o ácido oleico, e o glicerol com o ácido lático. De maneira análoga, o ácido oleico diminuiu a hidrofilicidade, enquanto com o ácido láctico obteve o resultado contrário. Embora o estudo tenha avaliado os ácidos, a conclusão do trabalho aponta para a necessidade de testar a modificação do amido de achira com uma mistura de ambos os ácidos durante o mesmo processo. Essa relação de sinergia é sugerida porque cada ácido demonstrou benefícios distintos para o material.

Em outro estudo focado na melhoria das propriedades de filmes compósitos de polietileno de baixa densidade (PEBD) e TPS produzidos por extrusão, Jannatiha e colaboradores (2025) demonstraram que a adição do ácido tartárico e do óleo de mamona atuaram de forma eficaz como agentes amaciantes e compatibilizantes. O mecanismo de compatibilização se deu em múltiplas frentes, quimicamente, o AT, facilitou a esterificação com o amido, por meio da formação de ligações éster. Estruturalmente, houve a diminuição da tensão interfacial e aumento da adesão entre o PEBD apolar e o TPS polar, resultando em uma superfície lisa e homogênea. Termicamente, a diminuição da T_g foi observada, indicando o aumento do volume livre e da mobilidade das cadeias.

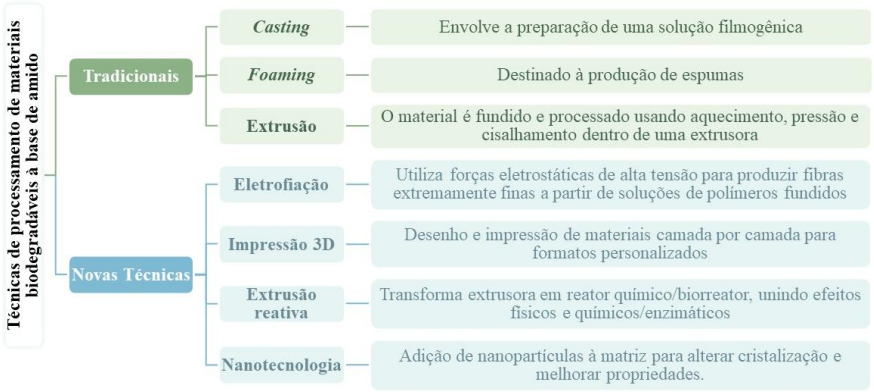
Portanto, pode-se notar que o uso de plastificantes e/ou aditivos é uma alternativa interessante para melhorar, dentre outras propriedades, as mecânicas, térmicas e estruturais do TPS. No entanto, a combinação AT e OM ainda não foi estudada em composições TPS. Assim, além do baixo custo, disponibilidade e origem natural, ambos os aditivos apresentam potencial

para influenciar simultaneamente a mobilidade das cadeias poliméricas e as interações interfaciais, podendo resultar em efeitos sinérgicos que combinam plastificação e/ou modificação química. A forma exata de atuação, contudo, depende do processamento do filme de TPS, bem como do impacto nas propriedades estudas.

3.3 Processamento de materiais biodegradáveis a base de amido

Existem diversas técnicas para o processamento de materiais biodegradáveis a base de amido. Elas são divididas em técnicas tradicionais, já bem consolidadas, e novas técnicas, que são focadas em funções avançadas e formatos variados. O estudo de Cheng et al. (2021) explora as diferentes técnicas existentes, conforme apresentado suscintamente na Figura 19.

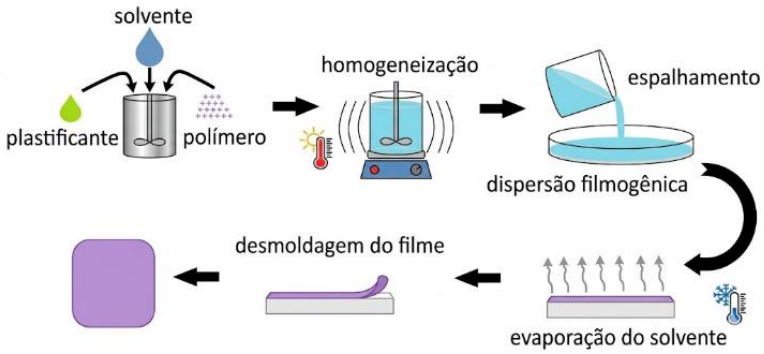
Figura 19 – Técnicas de processamento de materiais biodegradáveis à base de amido



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Em especial, a metodologia de *film solution casting*, *solvent casting*, ou simplesmente *casting* é muito empregada para a obtenção de filmes poliméricos e consiste na solubilização do polímero em excesso de solvente para a formação de uma solução filmogênica que é vertida em um molde e posta para secar para a evaporação do solvente (ÁVILA-MARTÍN et al., 2023). A Figura 20 apresenta de maneira esquemática a técnica de *casting*.

Figura 20 – Técnica de *casting*



Fonte: Adaptado de ÁVILA-MARTÍN et al., 2023.

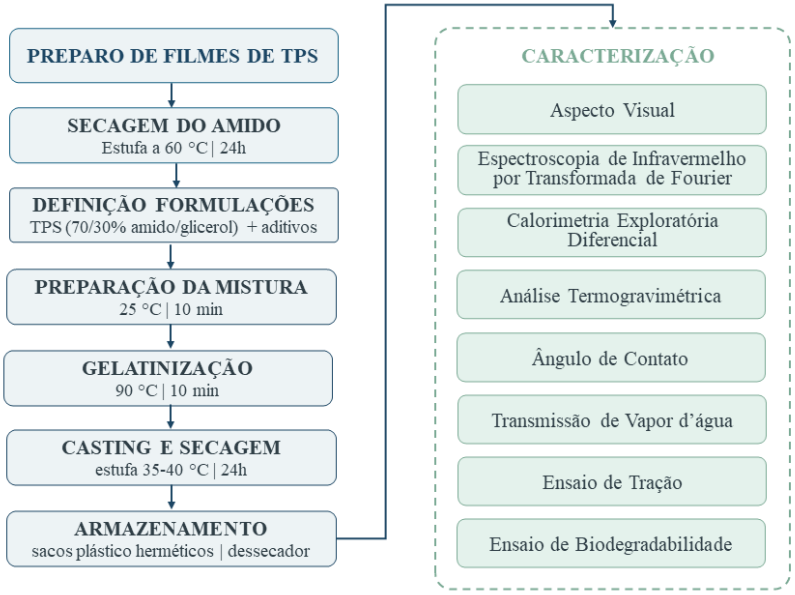
O método de casting é considerado uma boa opção por ser um processo de operação muito simples e de baixo custo de implementação. Ele é extremamente prático para a pesquisa laboratorial de novos materiais porque não exige os equipamentos robustos empregados pelos outros métodos, no entanto apresenta algumas limitações, tais como a dificuldade no controle da espessura dos filmes e da uniformidade do mesmo, além da inviabilidade de sua aplicação em larga escala, uma vez que a grande quantidade de água contida nas soluções exige tempos de secagem muito longos e alto consumo de energia (CHENG et al., 2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Visão geral

Uma visão geral dos procedimentos experimentais realizados neste trabalho é apresentada na Figura 21. A metodologia foi dividida em duas etapas: (i) preparo e obtenção dos filmes de amido termoplástico e (ii) caracterização dos materiais. As técnicas de caracterização foram feitas a fim de determinar as propriedades mecânicas, térmicas, de barreira, físicas e estruturais, além da biodegradabilidade.

Figura 21 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

4.2 Materiais

Os materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho incluíram amido de milho comercial (marca Kimimo), glicerol com 99,5% de pureza (Dinâmica), vinagre de álcool comercial (Dicasa) e água destilada. Adicionalmente, foram empregados como aditivos naturais o óleo de rícino comercial de densidade 0,957 g/cm³ (marca Bella Donna) e ácido L-(+)-tartárico com 99,5% de pureza (Neon).

4.3 Preparo dos filmes de amido termoplástico

Inicialmente, o amido foi submetido a etapa de secagem em estufa a 60 °C por 24h para retirada de umidade. Após a secagem, procedeu-se à síntese de filmes de TPS pela técnica de *casting*. Nesta etapa, fabricou-se filmes de TPS na proporção fixa de 70/30 (% m/m) de amido e glicerol, respectivamente, variando apenas a quantidade de aditivos adicionada (ácido tartárico – AT – e óleo de mamona – OM), conforme previamente estudado por Caicedo et al. (2019). Em um béquer, adicionou-se glicerol, água destilada, vinagre e os aditivos e misturou-se, com auxílio de agitação magnética, até completa solubilização. Para os filmes contendo ácido tartárico, o mesmo foi solubilizado previamente em água com auxílio de banho ultrassônico. Em seguida, sob agitação, foi-se adicionando o amido aos poucos até obter-se uma solução de aspecto leitoso e sem grumos. A solução resultante foi agitada por 10 minutos. Em seguida, a mistura foi aquecida ainda sob agitação até 90 °C e, após observação do início da gelatinização do amido, misturou-se mecanicamente por mais 10 min com auxílio de um bastão de vidro. As soluções filmogênicas foram vertidas sobre placas petri de poliestireno de 90 mm x 15 mm e postas para secar em estufa com circulação de ar entre 35 °C e 40 °C com umidade relativa ambiente por 24 horas. Por fim, os filmes secos foram armazenados em sacos plásticos herméticos devidamente identificados dentro de um dessecador até a etapa de caracterização e ensaios. A Tabela 4 apresenta as amostras produzidas e sua nomenclatura, bem como as quantidades de reagentes empregadas para a fabricação de 40 gramas de cada filme. A quantidade de aditivos adicionada, em porcentagem de massa, é referente à massa total de TPS produzida.

Tabela 4 – Composição das misturas preparadas a partir de TPS, AT e OM

Identificação da amostra	TPS (%)	OM (gramas/%)	AT (gramas/%)	Amido (gramas)	Glicerol (gramas)	Água (mL)	Vinagre (mL)
TPS	100	0/0	0/0	28	12	270	13,3
5% AT	95	2/5	0/0	26,6	11,4	270	13,3
15% AT	85	6/15	0/0	23,8	10,2	270	13,3
5% OM	95	0/0	2/5	26,6	11,4	270	13,3
15% OM	85	0/0	6/15	23,8	10,2	270	13,3
7,5% AT/OM	85	3/7,5	3/7,5	23,8	10,2	270	13,3

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

4.4 Caracterizações

4.4.1 Aspecto visual e rendimento dos filmes

Os filmes obtidos foram visualmente avaliados quanto à homogeneidade e distribuição dos aditivos, presença de bolhas, manchas e irregularidades superficiais. Além do aspecto visual, foi avaliado o rendimento de cada formação de acordo com o número de filmes produzidos. As observações foram registradas por meio de imagens.

4.4.2 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

A análise química e estrutural por meio da identificação de grupos funcionais presentes nos materiais foi realizada por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). A análise tem como objetivo investigar possíveis interações moleculares entre o TPS, óleo de mamona e ácido tartárico. Para realização do ensaio utilizou-se o equipamento Shimadzu modelo IR-Prestige 21. Os espectros foram obtidos por meio da análise direta das amostras na faixa de comprimento de onda de 400 a 4000 cm^{-1} registrada com 52 varreduras e resolução de 2 cm^{-1} utilizando a técnica de ATR (reflectância total atenuada).

4.4.3 Calorimetria exploratória diferencial

As propriedades térmicas foram estudadas por calorimetria exploratória diferencial (DSC). Para a realização do ensaio utilizou-se o equipamento da marca Perkin Elmer modelo DSC 6000 em que cerca de 10 a 20 mg do filme foi depositada em um cadinho de alumínio selado. Sob atmosfera de nitrogênio, as amostras foram submetidas a um ciclo de aquecimento único de 25 a 150 °C, a uma taxa de 20 °C/min não sendo realizada a remoção do histórico térmico. Devido à limitações estruturais do amido, múltiplos ciclos térmicos podem comprometer a estrutura do polímero, causando a quebra das cadeias e, portanto, afetando irreversivelmente a estrutura e cristalinidade do polímero (YU; CHRISTIE, 2001).

4.4.4 Análise termogravimétrica

A estabilidade térmica dos filmes foi avaliada por análise termogravimétrica (TGA). Uma amostra de cada filme foi cortada e submetida à análise em atmosfera de nitrogênio com taxa de aquecimento de 10 °C/min, de 20 ºC até 600 °C, conforme metodologia adaptada de

Caicedo et al., 2019. O equipamento utilizado na análise foi o analisador termogravimétrico da marca Hitachi modelo STA 7300.

4.4.5 Ângulo de contato

O ângulo de contato com a água é um ensaio utilizado para avaliar a hidrofilicidade ou hidrofobicidade da superfície de filmes, o que impacta diretamente na sua aplicabilidade em embalagens e na propriedade de barreira. Para a realização do ensaio, utilizou-se o analisador de ângulo de contato da marca Kruss modelo DSA100. Adotou-se o método da gota séssil estática. Para cada ensaio, uma gota de 10 µL de água foi depositada sobre a superfície do filme. A captura da imagem da gota foi realizada utilizando o software *Drop Shape Analysis* no início e no final do ensaio. Devido à natureza hidrofílica do amido termoplástico e à formação de ângulos de contato reduzidos, escolheu-se o método de ajuste de segmento circular (*Circle Fitting*) para a determinação dos ângulos, o qual avalia o contorno completo da gota espalhada. Foram medidos os ângulos de contato nos tempos 0, 1, 2 e 3 minutos após a deposição da gota.

4.4.6 Taxa transmissão de vapor d'água

O ensaio foi realizado conforme adaptação da norma ASTM E96/E96M a fim de calcular a taxa de transmissão de vapor d'água (do Inglês, *Water Vapor Transmission*, WVT) e determinar o comportamento de barreira dos filmes. Utilizou-se o método da água que consiste em selar a amostra na boca de um recipiente contendo água destilada e medir periodicamente a perda de massa do conjunto, determinando a taxa com que o vapor atravessa o material em direção a um ambiente com menor umidade. O material deve estar dentro de uma câmara controlada, neste caso, utilizou-se um dessecador de vidro com sílica gel azul a temperatura ambiente. A WVT, dada em g/h·m², é calculada de acordo com a Equação 1:

$$\mathrm{WVT} = \frac{G/t}{A} \tag{1}$$

onde, G/t é a inclinação da reta da taxa de perda de massa (variação da massa por unidade de tempo) e A é a área de teste em m².

Para a realização do ensaio, utilizaram-se béqueres de vidro de 100 mL como recipientes de teste. O diâmetro útil do béquer foi medido com auxílio de um paquímetro digital Starrett de resolução de 0,01 mm a fim de se obter a área de teste útil, igual a 1,676 x 10^{-3} m². Em cada

recipiente, adicionou-se 90 mL de água para garantir que a distância entre a superfície da água e a face inferior do filme ficasse estabelecida em 20 mm. Para assegurar que o fluxo de vapor ocorresse exclusivamente através da área de teste (a abertura da boca do béquer), desenvolveu-se um sistema de fixação e vedação externa. O filme foi posicionado sobre a boca do recipiente e suas bordas excedentes foram dobradas e fixadas à parede externa do vidro utilizando fita adesiva dupla face. Em seguida, aplicou-se fita isolante ao redor de toda a lateral externa para assegurar a fixação da área de teste.

Os conjuntos montados foram dispostos no dessecador. A massa do conjunto completo (béquer + água + filme + vedação) foi monitorada periodicamente por meio de uma balança analítica, registrando-se o tempo decorrido de cada medição. Realizou-se a coleta de dados, de pelo menos 6 registros de massa, número de registros suficientes para que a taxa de perda de massa atingisse um estado estacionário (perda de massa linear).

A análise dos dados foi realizada de forma numérica através da regressão linear da massa em função do tempo, considerando o período em que o sistema atingiu o estado estacionário. A WVT foi determinada dividindo-se a taxa pela área exposta do filme, conforme a Equação 1. Os ensaios foram conduzidos em triplicata para garantir a confiabilidade dos dados.

4.4.7 Ensaio de tração

As propriedades mecânicas dos filmes, como o módulo de elasticidade, limite de resistência a tração e ductilidade, foram determinadas por análise dinâmico-mecânica (DMA) em modo de tração uniaxial estático. Foram produzidos corpos de prova de 6,28 mm por 30 mm submetidos à secagem por 30 minutos a 35 °C previamente à realização do ensaio para eliminação de umidade residual proveniente do manuseio. O ensaio foi realizado a 25°C, aplicando-se uma pré-carga de 0,01 N e uma taxa de rampa de força linear de 0,25 N/min até a ruptura da amostra. Para realização do DMA utilizou-se o analisador dinâmico mecânico da marca TA Instruments, modelo DMA 850 e os ensaios foram realizados em triplicata a fim de garantir a confiabilidade dos resultados.

4.4.8 Ensaio de biodegradabilidade

A fim de avaliar a biodegradabilidade dos filmes, bem como a possível influência dos aditivos nesta propriedade, realizou-se o ensaio de suscetibilidade microbiana em solo, ou biodegradação**,** conforme adaptação da norma ASTM G160-12. A avaliação do grau de

deterioração foi determinada por análise visual em três períodos de exposição ao solo diferentes: 15, 30 e 45 dias de enterramento.

Inicialmente os filmes foram cortados nas dimensões de 50 mm por 50 mm, respeitando o tamanho mínimo estabelecido pela norma para materiais em formato de filme, e posteriormente submetidos à secagem a 35 °C por cerca de 30 minutos para a retirada da umidade residual absorvida durante o manuseio dos filmes. Foram utilizadas três replicatas para cada período de exposição, conforme o mínimo exigido para ensaios de avaliação visual. O soterramento foi realizado utilizando copos de poliestireno com capacidade de 200 mL como recipientes. Como substrato utilizou-se terra vegetal comercial para plantas. Os copos foram acondicionados em estufa incubadora, à temperatura de 30 °C e atmosfera ambiente. A terra foi umedecida com água potável para manutenção da umidade natural de três em três dias.

A norma estabelece que as amostras não podem ser retiradas do solo e posteriormente devolvidas, pois a perturbação do leito afeta o crescimento microbiano e gera resultados inconsistentes. Portanto, foram preparados recipientes independentes, devidamente identificados para cada intervalo de avaliação e amostra, totalizando assim 9 copos para cada amostra em análise e 54 copos no total.

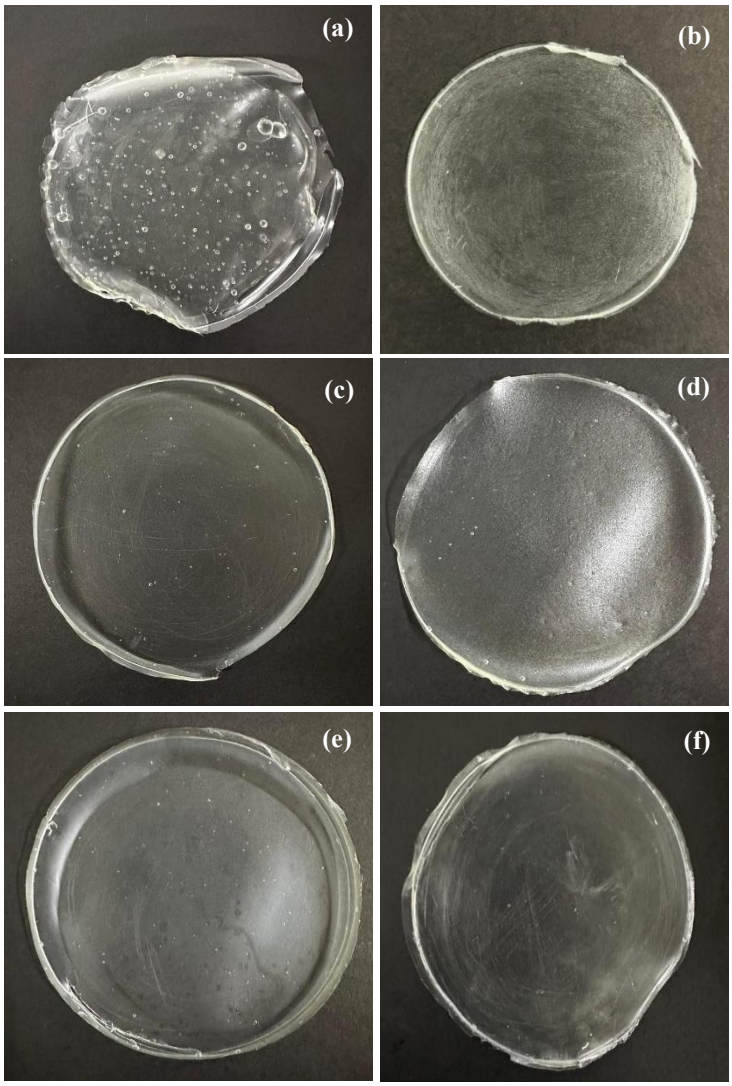
Ao término de cada intervalo, os respectivos recipientes foram retirados do soterramento. Devido à alta solubilidade do TPS em água, o enxágue sob água corrente inviabilizaria a análise ao comprometer a amostra já fragilizada. Sendo assim, a terra aderida à superfície dos filmes foi removida cuidadosamente a seco. A biodegradabilidade foi avaliada observando o crescimento de microrganismos por meio de manchas e desfiguração na superfície do filme.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Aspecto visual e rendimento dos filmes

A análise do aspecto visual dos filmes é importante antes das caracterizações, uma vez que a partir dela foi possível identificar características, como presença de bolhas e fissuras, distribuição dos aditivos e aspecto tátil proporcionado pelos mesmos, que são bons indícios sobre a atuação dos aditivos no filme de TPS. A Figura 22 presenta o aspecto visual dos filmes obtidos.

Figura 22 – Filmes de amido termoplástico



(a) TPS; (b) 7,5% AT/OM; (c) 5% OM; (d) 15% OM; (e) 5% AT; (f) 15% AT.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Em relação ao aspecto visual, observa-se que cada amostra obteve características distintas. Verificou-se que o filme de TPS puro foi o filme menos homogêneo de todos, apresentando diversas bolhas e ondulações. Uma característica identificada nesse filme que não ocorreu nos demais, foi o dobramento e posterior quebra do biopolímero com a progressão do tempo de secagem. Isso significa que o TPS apresenta uma tendência de dobramento e aumento da fragilidade especialmente para filmes mais finos, o que deve estar correlacionado com a retirada de umidade do material, uma vez que a água também atua como plastificante. O ocorrido também é um indicativo de que o material se encontra abaixo da sua T_g.

Em contrapartida, observa-se que os filmes com aditivos apresentam uma diminuição drástica de bolhas, apresentando um aspecto mais liso e uniforme. Isso se dá pela diminuição da viscosidade do gel, o que permite, que ao final da gelatinização, as bolhas de ar subam com mais facilidade para a superfície. Conforme Santos et al. (2025) relata, a incorporação de ácido tartárico no TPS diminui a viscosidade drasticamente. Isso permitiu que a mistura fosse mais facilmente vertida no molde, melhorando a uniformidade. O rendimento, ou seja, número de filmes obtidos com a mesma quantidade de TPS produzida para todas as amostras é um fator que corrobora a diminuição da viscosidade. De maneira qualitativa, apesar da maior dificuldade do método de *casting* ser o controle da espessura, conforme apresenta a Tabela 5, produziu-se um maior número de filmes com aditivos em comparação com o TPS puro. Em especial, destaca-se o filme de 7,5 % AT/OM que apresentou o maior rendimento dentre todas as amostras, podendo indicar um efeito sinérgico na diminuição da viscosidade quando ambos os aditivos são adicionados.

Tabela 5 – Rendimento qualitativo dos filmes de TPS

Amostra	Quantidade de Filmes Produzidos
TPS	11 filmes
5% AT	16 filmes
15% AT	17 filmes
5% OM	14 filmes
15% OM	14 filmes
7,5% AT/OM	19 filmes

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Os filmes com óleo de mamona apresentaram um aspecto rugoso, conforme melhor visualizado na Figura 22(d), o que não foi observado nos demais filmes. Ademais, esses filmes foram mais facilmente descolados do molde em comparação com os demais. Por outro lado, os filmes de ácido tartárico apresentam menor uniformidade, com uma superfície com mais

ranhuras e opacidade. Esse resultado pode estar relacionado com a dificuldade de homogeneização do ácido, que é um reagente sólido em pó, e sua posterior recristalização. Isso também é corroborado pelo embranquecimento do filme de 15% observado quatro dias após seu preparo, conforme mostrado na Figura 23, devido à concentração excessiva de ácido nesta amostra. Ademais, outro detalhe importante dos filmes de AT foi a necessidade de posterior secagem em dessecador, visto que o tempo de 24h a 35 °C padronizado para todas as secagens não foi suficiente para a secagem completa, ou seja, ao final do tempo estabelecido, os filmes ainda apresentavam aspecto grudento.

Figura 23 - Embranquecimento do filme de 15% AT



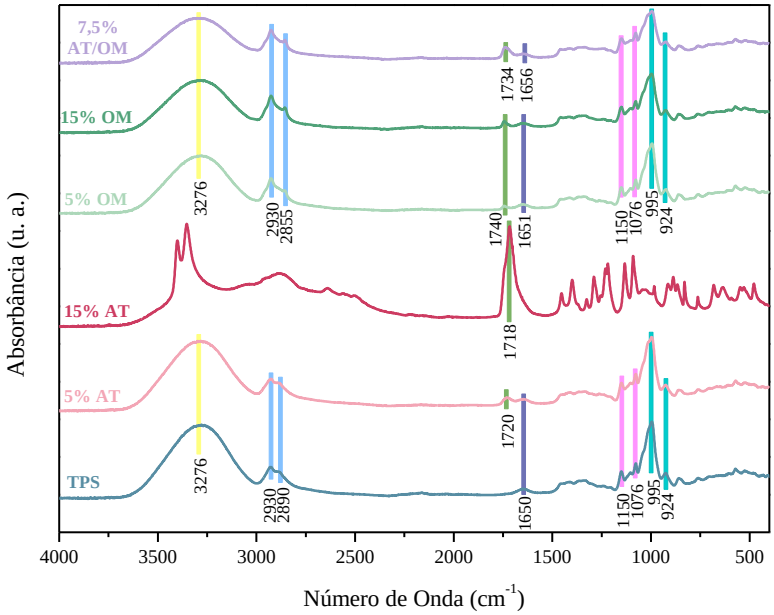
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Por fim, os filmes de AT/OM têm a combinação de características dos filmes separados. Isto é, os filmes exibem aspecto rugoso e não precisaram de secagem excedente, mas também possuem ranhuras e falta de homogeneização. Dentre todas as formulações, essa apresentou a menor quantidade de bolhas.

5.2 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

Os espectros de FTIR das amostras são apresentados na Figura 24. De maneira geral, os espectros das formulações se assemelham e estão de acordo com o reportado na literatura para TPS plastificado com glicerol, com exceção para a amostra de 15% AT (GEBRESAS; SZABÓ; MAROSSY, 2023; PALUCH et al., 2022; SANTOS et al., 2025). A Tabela 6 apresenta o tipo de vibração, o grupo funcional e o material correspondente a cada banda observada nos espectros de FTIR.

Figura 24 – Espectro de FTIR das amostras



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Tabela 6 – Bandas identificadas nos espectros de FTIR

Número de Onda (cm^{-1})	Vibração e Grupo Funcional	Material
3276	Estiramento O-H	Amido, glicerol, ácidos
2930-2850	Estiramento C-H	TPS, glicerol e ácidos
1700-1800	Estiramento C=O	Ácidos (éster)
1650	Dobramento O-H	Amido, água
1150-1076	Estiramento C-O-H	Amido, TPS, glicerol
995-924	Estiramento C-O-C	Amido, TPS

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026

A banda em 3276 cm^{-1} é característica das vibrações de estiramento de grupos hidroxila, cujo perfil é influenciado pela formação de ligações de hidrogênio entre o amido e o plastificante. Possíveis alterações nesta banda com a adição de concentrações distintas de aditivos, podem estar relacionadas com o consumo desses grupos hidroxila para a formação de ligações éster entre o amido e os aditivos.

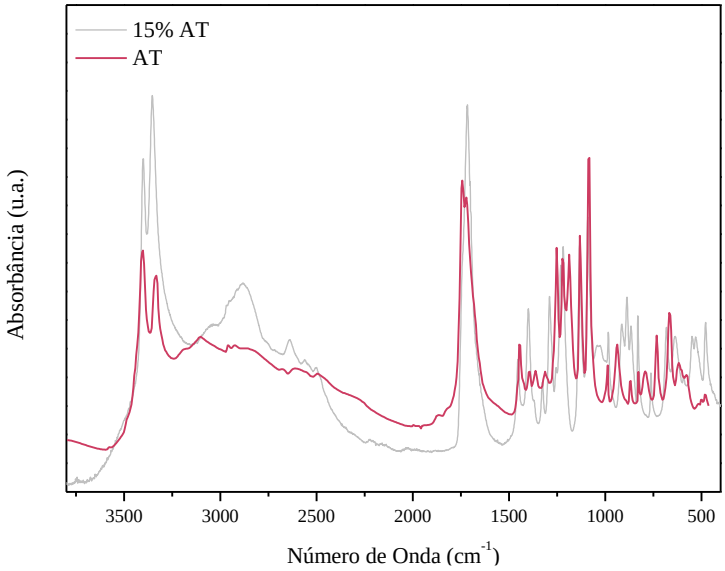
As bandas entre 2800–3000 cm^{-1} representam vibrações de estiramento simétricas e assimétricas dos grupos metil (CH_3) que estão presentes em todos os componentes da mistura. A banda em 2890 cm^{-1} está presente nas amostras de TPS e 5% AT enquanto a banda de 2855 cm^{-1} aparece nos espectros das amostras de 5% OM, 15% OM e 7,5% AT/OM. A mudança dessas bandas pode estar relacionada com a alteração da vizinhança química provocada pela incorporação dos aditivos e a interação dos mesmos com as cadeias de amido e glicerol.

Segundo Paluch et al. (2022), Gebresas; Szabó; Marossy (2023) e Santos et al. (2025), a banda próxima de 1648 cm^{-1} corresponde à vibração de deformação dos grupos hidroxila e está relacionada à presença de água adsorvida nas regiões amorfas dos grãos de amido. Mudanças nesta banda podem indicar maior conteúdo de água e por sua vez maior interação da mesma durante o processo de plastificação ou a sua evaporação incompleta.

Foram observadas bandas em 1150 cm^{-1} e 1076 cm^{-1} e com menor intensidade em 1103 cm^{-1} que estão relacionados com o estiramento do grupo C–O–H presentes no TPS. Ademais, a banda identificada em 995 cm^{-1} está relacionada com o estiramento da ligação C–O presente no grupo C–O–C, sendo a banda mais intensa dos espectros, exceto de 15% AT. Adicionalmente, a banda observada em 924 cm^{-1} está relacionada com as ligações glicosídicas estruturais da cadeia de amido. Paluch et al. (2022) observaram a redução do número de onda de 928 cm^{-1} no amido puro para 924 cm^{-1} no TPS, indicando que durante a plastificação do amido, com temperatura e cisalhamento, as ligações glicosídicas são quebradas, o que reflete na diminuição do número de onda. Paralelamente, Santos et. al (2025) discutem que a incorporação de ácidos no TPS não altera o perfil do pico identificado em 925 cm^{-1} para o esqueleto do amido e, portanto, essa banda foi utilizada para a normalização dos espectros. Para o presente estudo, não foi observado alterações no número de onda para a banda de 924 cm^{-1} nas amostras estudadas, exceto para a de 15% AT.

Esses resultados indicam que os aditivos foram bem dispersos na matriz de TPS, mantendo as bandas largas características do amido. No entanto, o mesmo não pode se afirmar da amostra de 15% AT, uma vez que o padrão espectral desta amostra não é semelhante às demais. Na prática, o espectro de 15 % AT aproxima-se do espectro do ácido tartárico puro, cujos dados de referência foram obtidos na base do *National Institute of Standards and Technology* (NIST), conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Espectro de FTIR de AT e 15% AT

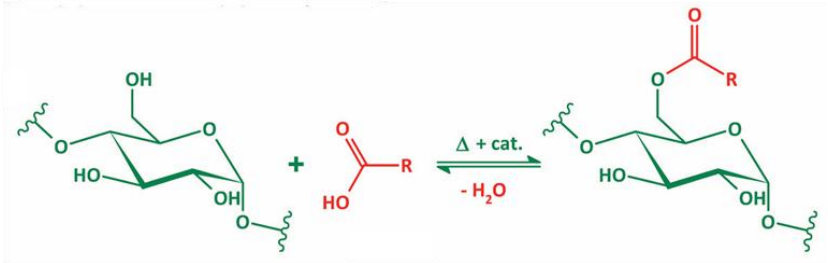


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Corroborando a análise visual da Figura 23, este resultado reforça a hipótese de que o limite de solubilidade do AT na matriz de amido foi ultrapassado, provocando a cristalização do AT em excesso na superfície do filme, e, portanto, resultando no aspecto esbranquiçado. A confirmação desta recristalização é evidenciada pelo padrão de picos da amostra de 15% AT semelhante à amostra de AT, principalmente em 3400 cm^{-1} e 3335 cm^{-1} (estiramento O-H), 1131 cm^{-1} e 1084 cm^{-1} (estiramento C-O). Observou-se um deslocamento da banda de 1742 cm^{-1}, referente ao estiramento C=O da carboxila, para 1718 cm^{-1}, o que pode indicar mudanças químicas na estrutura do material.

Além disso, foi identificado nos espectros bandas entre 1700-1750 cm^{-1}, atribuídas ao estiramento C=O de éster, que não foram observadas no espectro do TPS puro. O surgimento dessa banda, conforme discutido na literatura, acontece devido à formação de ligações químicas entre a carboxila presentes no AT e OM e as hidroxilas do amido e glicerol, conforme reação mostrada na Figura 26.

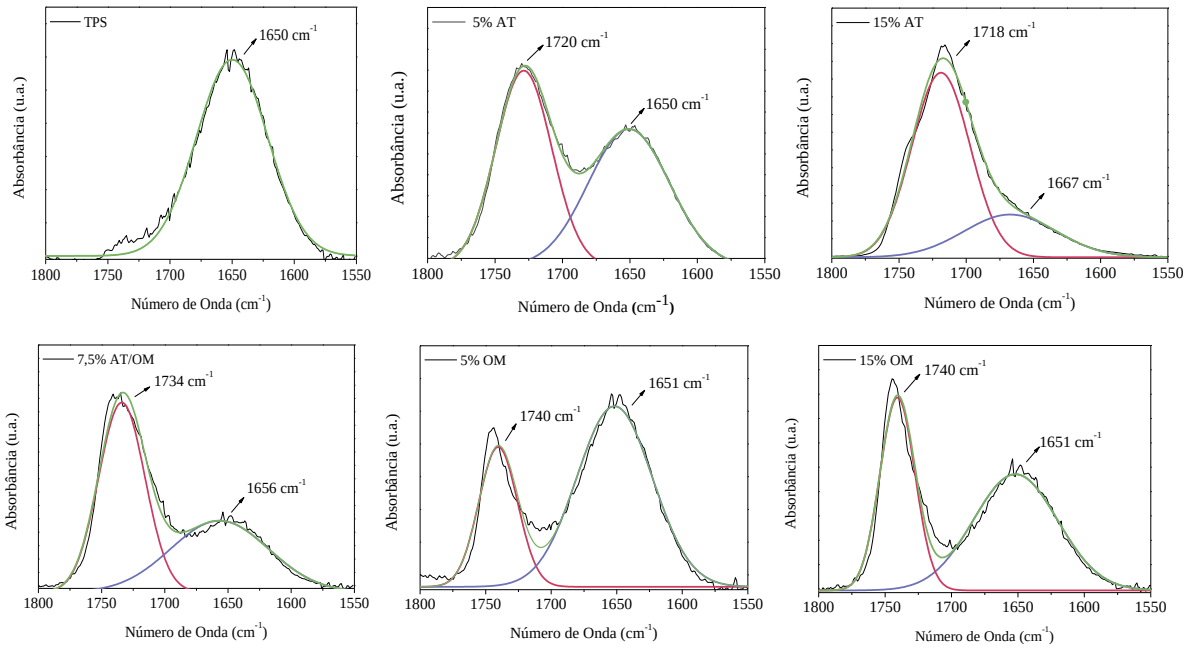
Figura 26 – Reação de esterificação do amido



Fonte: IMRE; VILAPLANA, 2020.

Santos et. al (2025) comprovaram a esterificação com a formação de uma banda em 1720 cm^{-1}, enquanto Gebresas et. al (2023) obtiveram o mesmo resultado em 1738 cm^{-1} para amostras de TPS com ácido tartárico. Ademais, em compósitos de PEBD/TPS com AT e OM, Jannatiha e colaboradores (2025) identificaram bandas em 1737 cm^{-1} e 1741 cm^{-1} para AT e 1742 cm^{-1} e 1744 cm^{-1} para OM. Portanto, a fim de compreender melhor o efeito da incorporação dos aditivos na estrutura química do TPS, realizou-se a deconvolução gaussiana na região entre 1800 cm^{-1} e 1550 cm^{-1}, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Deconvolução da banda na região de 1800–1550 cm^{-1}



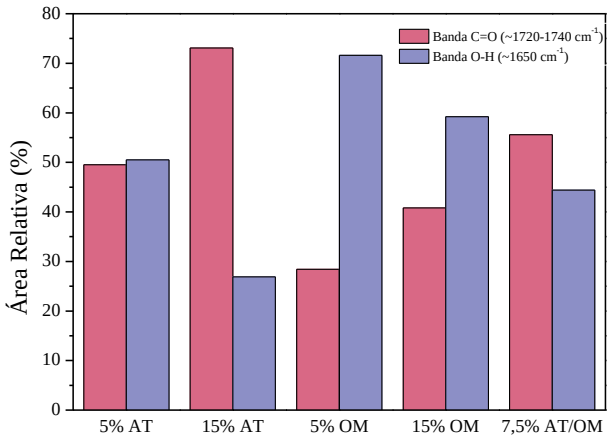
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Os resultados mostram que o TPS apresentou uma banda única, apenas em 1650 cm^{-1}. As amostras de AT apresentaram picos em 1728 cm^{-1} e 1650 cm^{-1} para 5% AT e 1718 cm^{-1} e 1667 cm^{-1} para 15% AT. Conforme discutido por Paluch e colaboradores (2022), o número de onda no qual as bandas características de uma determinada ligação é observado diminui com o aumento da força de interação molecular. Este resultado sugere a formação de ligações de hidrogênio mais intensas entre o amido e o aditivo. Em contrapartida, o deslocamento da banda de 1650 cm^{-1} para maiores números de onda pode estar relacionado com a perda de água por evaporação durante o processo, uma vez que as ligações de hidrogênio estão mais fracas, o que impede a retenção de moléculas de água, bem como, com a mudança da estrutura química.

Para as amostras com OM, foram identificadas bandas em 1740 cm^{-1} e 1651 cm^{-1} para ambas as concentrações estudadas. O OM possui naturalmente grupos funcionais éster,

portanto a banda de 1740 cm^{-1} é esperada para estas amostras. Como não foi observada uma mudança no número de onda com o aumento da concentração de óleo, a esterificação com a adição de óleo de mamona no TPS pode ter ocorrido de forma menos intensa quando comparada com os resultados obtidos para o AT. Por fim, para a amostra de 7,5 AT/OM, as bandas foram identificadas em 1734 cm^{-1} e 1656 cm^{-1}, exibindo uma condição intermediária entre os resultados encontrados para AT e OM. A esterificação das amostras ainda é corroborada pelo aumento da área relativa das bandas em 1740 cm^{-1}, para as amostras com OM, e 1720 cm^{-1} para as amostras com AT, em relação à banda associada vibrações de dobramento O-H da água (~1650 cm^{-1}), com o aumento da concentração de aditivo, conforme ilustrado na Figura 28. Uma vez que os espectros não foram normalizados, não se pode afirmar um aumento na quantidade de ligações éster, no entanto, o aumento contínuo da área relativa do pico em ~1720 cm^{-1} (AT) e ~1740 cm^{-1} (OM) com o aumento da concentração de aditivos reflete a crescente dominância dos grupos carbonila no material.

Figura 28 – Área relativa das bandas de deconvolução

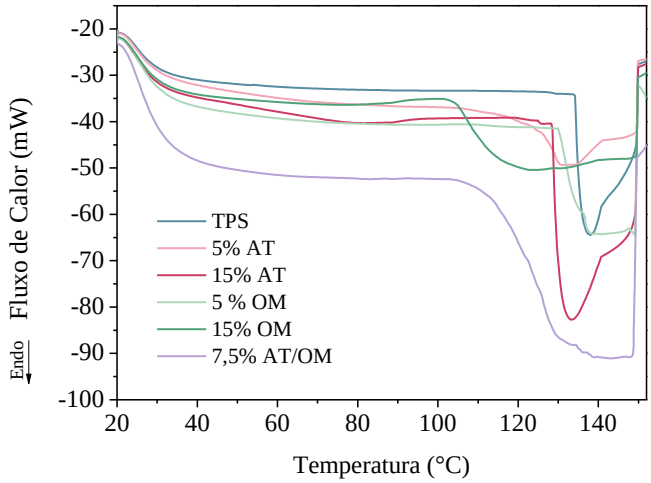


Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

5.3 Calorimetria exploratória diferencial

As curvas de DSC obtidas durante o primeiro ciclo de aquecimento das amostras é apresentada na Figura 29. Utilizou-se a convenção “endotérmico para baixo” em que os processos de absorção de energia são representados por picos negativos.

Figura 29 – Curvas de DSC das amostras



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

A partir da análise dos termogramas, não foi possível identificar a T_g das amostras de TPS investigadas. A dificuldade de mensurar a T_g do TPS via DSC é relatada na literatura. Caicedo et al. (2019) apenas determinou a temperatura de fusão (T_m) e a entalpia de fusão (ΔH_m) com base no primeiro ciclo de aquecimento. Em outro estudo, Pooja et al. (2024a) determinaram apenas a temperatura de pico de gelatinização de filmes de amido de diferentes fontes, o que possibilitou a discussão da estabilidade térmica dos filmes. De maneira análoga, neste trabalho foi apenas avaliada a fusão das amostras estudadas, indicada pelos picos endotérmicos presentes em todos os termogramas.

A determinação da T_g do TPS é de grande relevância para o estudo, uma vez que permite a discussão da atuação dos aditivos com agentes plastificantes. No entanto, sua determinação por meio dessa técnica ainda é um desafio, devido à complexidade inerente do amido, que pode passar por diversos comportamentos térmicos durante o aquecimento, como gelatinização, fusão, degradação e mudanças de volume. Existem diversos fatores que afetam a obtenção da T_g do amido. Dentre eles, destacam-se o tipo de panela (alumínio ou aço), a massa do substrato, a preparação da amostra, umidade e taxa de aquecimento. Além disso, devido à fraca variação de entalpia registrada, o salto da T_g em muitos casos é sutil e pode ser confundido com perda de água, refletida pela variação da linha de base no sentido endotérmico de calor. Somado a isso, a baixa condutividade térmica dos grãos de amido reduzem a intensidade dos picos, tornando-os mais alargados o que também impacta na resolução do termograma (YU; CHRISTIE, 2001).

Apesar desses fatores influenciarem diretamente os resultados obtidos nas curvas, ainda pode-se levantar hipóteses sobre as propriedades estruturais dos filmes. Analisando os dados,

observa-se um alargamento dos picos para todas as amostras, exceto de TPS e 15% AT. A semelhança dos picos entre essas duas amostras pode ter relação com o maior grau de cristalinidade do TPS, em comparação com as amostras com aditivos, e da amostra de 15% AT, devido ao excesso de ácido tartárico presente no filme, assim como apresentado anteriormente.

Conforme discutido por Yu e Christie (2001), a forma de medição via DSC e as características da amostra exercem grande influência sobre a forma do pico. Os autores apontam que o aumento da massa da amostra eleva a sensibilidade, mas diminui a resolução, o que resulta diretamente no alargamento dos picos e na possível sobreposição de picos vizinhos. Isso é bem observado na amostra de 7,5 AT/OM que apresentou maior intensidade e alargamento do pico, possivelmente devido a maior massa utilizada no ensaio, de 22,30 mg, em comparação com 14,90 mg da amostra de 5% OM, a segunda maior massa utilizada. A massa das demais amostras foram semelhantes, entre 10 mg e 14 mg.

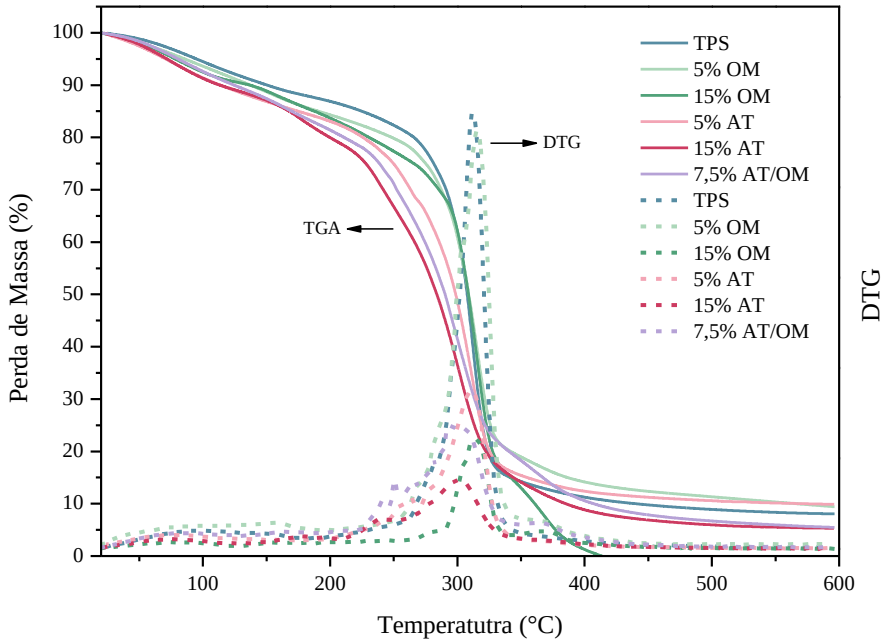
Ao avaliar amostras de TPS plastificadas com glicerol contendo ácido lático e ácido oleico, Caicedo e colaboradores (2019) afirmam uma maior influência na absorção de calor nas amostras contendo ácido lático. Isso se deu devido ao impedimento estérico e pelo tamanho elevado da estrutura molecular do ácido oleico, que prejudica a sua compatibilidade com a matriz e assim, resultada em picos sobrepostos. Os autores concluem que esse alargamento deve ser interpretado como um indicativo de fraca interação química com o amido. De maneira análoga, essa hipótese pode ser levantada para a amostra de 15% OM devido à baixa intensidade a alargamento do pico.

Em suma, as variações no alargamento e na intensidade dos picos de fusão refletem tanto os efeitos instrumentais decorrentes da massa e das limitações da amostra, quanto a eficácia das interações físico-químicas entre TPS e aditivos.

5.4 Análise termogravimétrica

Os resultados da análise termogravimétrica para as amostras estudadas são apresentados na Figura 30. As linhas sólidas representam os resultados de TGA enquanto as linhas pontilhadas a primeira derivada da curva de TGA, ou DTG, em que é possível observar com maior precisão os eventos térmicos ocorridos. A Tabela 7 apresenta a temperaturas correspondentes ao início e ao fim do evento térmico identificado, a temperatura máxima, onde a taxa de degradação é máxima para este evento, e o teor de cinzas de cada amostra estudada.

Figura 30 – Curvas de TGA e DTG das amostras



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de TGA/DTG

Amostra	Temperatura de Início (°C)	Temperatura de Fim (°C)	Teor de Cinzas (%)
TPS	287,53	327,22	8,05
5% AT	276,97	328,17	9,87
15% AT	252,13	333,03	5,32
5% OM	291,15	331,31	8,43
15% OM	295,48	338,84	-
7,5% AT/OM	257,33	337,84	5,47

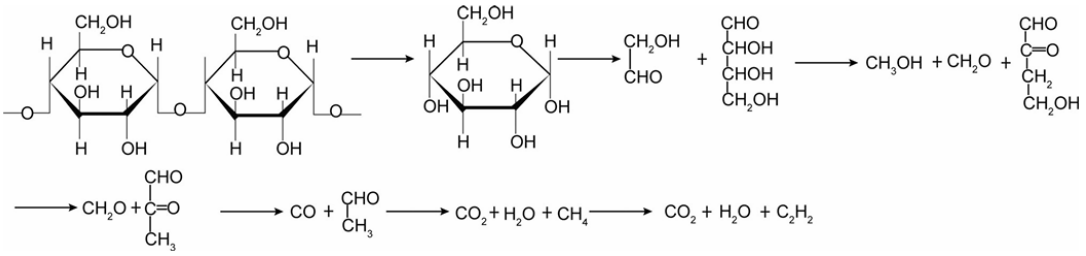
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

De maneira geral, as amostras exibiram comportamentos similares. Como relatado na literatura, o TPS apresenta 4 eventos térmicos. O primeiro está relacionado com a volatilização da água, com temperatura de início em cerca de 75°C; o segundo com a volatilização/decomposição do glicerol, com temperatura de início em cerca de 250°C; o terceiro está relacionado com a quebra das cadeias de amido para formar fragmentos menores, com temperatura de início em cerca de 300°C; e o último evento é a degradação dos fragmentos em moléculas simples (gases) até a carbonização, entre cerca de 490 °C e 530 °C (LIU et al., 2022; SANTOS et al., 2025).

Liu e colaboradores (2022) propuseram um mecanismo de degradação térmica do TPS, conforme mostrado na Figura 31. Neste mecanismo, com o aumento da temperatura ocorre a

desidratação intermolecular e intramolecular, devido a presença dos grupos -OH, das unidades de glicose, o que ataca as ligações α-1,4 e α-1,6 do amido, produzindo fragmentos de glicose que consequentemente reagem com o amido acelerando a decomposição do mesmo. A quebra das unidades de glicose gera uma série de produtos de decomposição gasosos de baixo peso molecular, tais como água, gás carbônico (CO_2) e acetileno (C_2H_2).

Figura 31 – Mecanismo de degradação térmica do TPS



Fonte: LIU et al., 2022.

Em todas as formulações estudadas, uma perda de massa de cerca de 10% a temperaturas entre 50 °C e 150 °C está associada com a perda de água e moléculas de baixa massa molar e é representada pelo sutil aumento da curva de DTG na região (SANTOS et al., 2025; TARIQUE; SAPUAN; KHALINA, 2021). Os resultados revelam que as amostram que continham AT apresentaram uma estabilidade térmica inferior à do TPS (287,53 °C), enquanto as amostras com OM foram termicamente mais estáveis. A amostra com maior estabilidade térmica foi a de 15% OM com início da degradação térmica em 295,48 °C ao passo que a amostra com menor estabilidade foi a de 15% AT com início da degradação térmica em 252,13 °C.

Ao analisar os dados, observou-se uma tendência da diminuição da estabilidade térmica com o aumento da concentração de ácido tartárico e uma tendência inversa foi observada com o aumento da concentração de óleo de mamona. Essa tendência também foi observada no estudo de Caicedo et al. (2019), em que formulações de TPS, plastificadas com glicerol, com adição de ácido oleico exibiram maior estabilidade térmica, enquanto as formulações com ácido lático apresentaram estabilidade térmica inferior à do TPS, em ambos os casos com a concentração máxima de aditivo analisada no estudo (9%). Para o ácido oleico, o mecanismo responsável pelo aumento da estabilidade reside na longa cadeia carbônica do aditivo que pode formar complexos de lipídio-amilopectina que aumentam a cristalinidade e, portanto, a estabilidade térmica. De forma análoga, o OM utilizado nesta pesquisa atua por um mecanismo semelhante. Por ser constituído majoritariamente por ácido ricinoleico, que possui uma longa cadeia alifática e um grupo hidroxila, o OM também pode formar ligações de hidrogênio e complexos com a amilopectina, gerando uma rede estrutural mais densa que justifica o aumento da

estabilidade térmica das formulações. Para o ácido lático, os autores afirmam que a queda estabilidade com o aumento da concentração está relacionado com as interações entre aditivo e plastificante. Esse fenômeno pode explicar o resultado obtido para o ácido tartárico. O excesso de AT resultou em uma menor interação com a matriz, o que foi corroborado pela análise visual que demonstrou menor homogeneização e acúmulo do ácido pelo embranquecimento.

Além da estabilidade térmica, o efeito dos aditivos também pode ser observado nas curvas de DTG. Observou-se principalmente a diminuição da intensidade do pico com a incorporação de aditivos, com exceção da amostra de 5% OM. Isso indica que, para as referidas amostras, a taxa de perda de massa diminuiu, ou seja, a degradação ocorreu de forma mais lenta, sugerindo uma mudança na interação entre TPS e aditivos que altera as ligações intermoleculares entre as cadeias de amido.

Santos e colaboradores (2025) descrevem um aumento da estabilidade térmica de ácidos orgânicos, como o ácido tartárico, com o aumento do número de grupos hidroxila em sua estrutura. Isso acontece, pois as hidroxilas tendem a formar fortes ligações de hidrogênio com os próprios grupos carboxila presentes na estrutura, o que pode impedir a interação de grupos químicos na formação de novas ligações na esterificação. De maneira análoga, avaliando a estrutura do AT e do OM, observa-se que o óleo de mamona contém um grupo hidroxila a mais que o ácido tartárico, reforçando, portanto, a hipótese de esterificação reduzida, como sugerido pelos resultados de FTIR. Ademais, a incorporação de ácidos orgânicos favorece a hidrólise ácida durante o processamento e esterificação, o que resulta na quebra das cadeias poliméricas em fragmentos menores de baixa massa molar que possuem hidroxilas livres disponíveis para interagir com a água. Segundo o mecanismo de degradação, isso facilita a desidratação intramolecular, assim diminuindo a estabilidade térmica, o que é bem representado pela amostra de 15% AT (LIU et al., 2022; SANTOS et al., 2025).

A diferença nos teores de cinza dos filmes está provavelmente associada com a volatilização de plastificantes e aditivos adicionados, uma vez que foi observado menores teores de cinza com o aumento da concentração de ambos os aditivos, bem com a menor quantidade de amido nas referidas amostras (CAICEDO et al., 2019; SANTOS et al., 2025). A ausência de teor de cinzas para a amostra de 15% OM não representa um valor nulo real, mas sim um provável erro decorrente de uma falha de leitura do equipamento durante a medição.

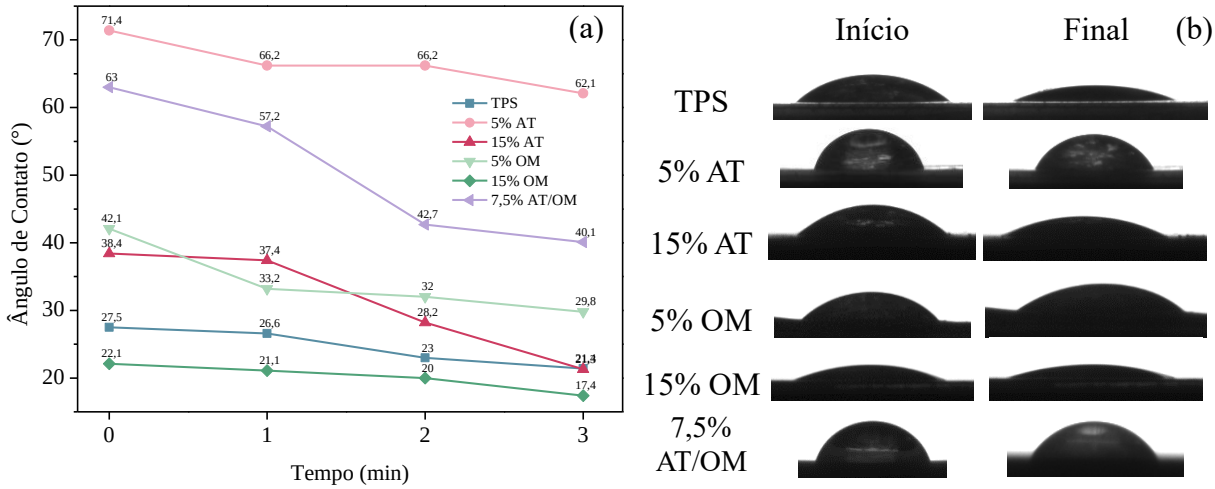
Em suma, o aumento da estabilidade térmica das amostras com OM está relacionado com o impedimento estérico das longas cadeias de ácido graxo, bem como o número elevado de hidroxilas que favorece a formação de ligações de hidrogênio entre o aditivo e o amido, atrasando a degradação térmica. Por outro lado, a diminuição da estabilidade nas amostras com

AT, inclusive na amostra de 7,5 % AT/OM, está ligada à hidrólise ácida que acelera a degradação térmica, bem como na esterificação e formação de ligações éster que reduzem a quantidade de hidroxilas disponíveis para formação de ligações intermoleculares fortes e, além disso, possuem menor estabilidade térmica.

5.5 Ângulo de contato

Os resultados do ensaio de ângulo de contato para as amostras são apresentados na Figura 32, onde (a) apresenta a medida do ângulo da gota com a superfície com o passar do tempo e (b) apresenta a imagem capturada para todos os filmes no início do ensaio (tempo 0 min) e no final (após 3 min).

Figura 32 – Resultados de ângulo de contato



(a) valores; (b) imagens.
Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Os resultados mostram que em todos os filmes, o ângulo de contato diminuiu com o passar do tempo, reforçando a natureza hidrofílica do amido e indicando absorção de água pelo material. O modo de preparo, o tipo de amido e a quantidade de água retida são fatores que afetam a molhabilidade e, portanto, os valores encontrados para os filmes produzidos diferem da literatura. O ângulo de contato para o TPS foi de 27,5° com redução para 21,4° em 3 minutos, uma diminuição de 22,2%. Caicedo e colaboradores (2019) encontraram um ângulo de 31,3° para o TPS de achira plastificado com glicerol, enquanto Pooja et al. (2024a) encontraram 35,72° e 25,36° respectivamente para amidos de batata e arroz. De maneira geral, é relatado na literatura um aumento do ângulo de contato com a incorporação de ácidos orgânicos, como o

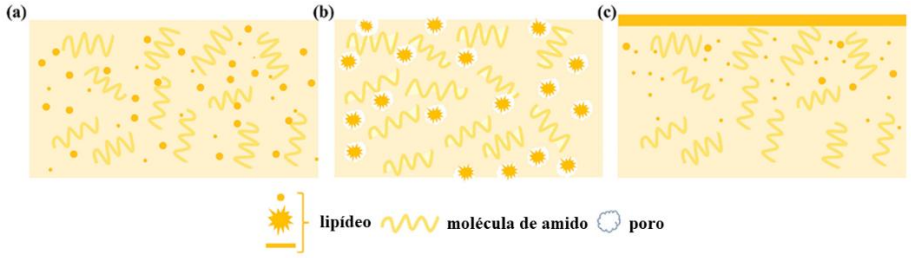
AT. Pooja et al. (2024a) afirma um aumento da hidrofobicidade em filmes de TPS modificados com ácido cítrico por reticulação, com um aumento no ângulo de contato de 35,72° para até 102,36°. Em outro estudo, Jannatiha e colaboradores (2025) também observaram uma aumento da hidrofobicidade em blendas de PEBD/TPS modificadas com ácido tartárico e a diminuição da hidrofobicidade nas blendas modificadas com óleo de mamona com ângulos de contato (69,42° a 72,66°) menores do que a da blenda controle sem aditivos (91,99°).

Observou-se que houve um aumento da hidrofobicidade de todos os filmes (levando em consideração o tempo zero), exceto para o de 15% OM, em comparação com o TPS. Dentre os resultados, destacam-se o filme de 5% AT com maior hidrofobicidade, exibindo um ângulo de contato de 71,4° no tempo zero e de 62,1° no tempo de 3 minutos, representando uma redução de 13,0%. O filme de 7,5% AT/OM também apresentou boa diminuição da hidrofilicidade, com um ângulo de 63° no tempo zero, mas com uma queda abrupta para 40,1° no tempo de 3 minutos, representando alta porcentagem de redução (36,4%). O aumento do ângulo de contato em relação ao TPS nas amostras contendo AT é um indício da esterificação e formações de novas ligações químicas que conectam as cadeias poliméricas do amido. No entanto, obteve-se um resultado inferior do filme de 15% AT, quando comparado ao de 5% OM. Registrou-se o ângulo de contato para o filme de 15% AT, de 38,4° no tempo zero para 21,3° em 3 minutos, representando a maior queda registrada (44,3%) contra 42,1° no tempo zero para 29,8° em 3 minutos (queda de 29,2%) para o filme com 5% de OM. Visto que a amostra de 15% apresenta excesso de reagente na superfície, a queda de ângulo de contato pode ser explicada devido à hidrólise ácida causada pelo AT que fragmenta as cadeias e resulta em grupos hidroxilas livres na superfície disponíveis para a interação com as moléculas de água, formando ligações de hidrogênio e, portanto, apresentando maior absorção de água em comparação com as demais proporções contendo AT.

Por fim, a melhor molhabilidade, ou seja, menor hidrofobicidade, foi do filme de 15% OM, com ângulo inferior ao de TPS, de 22,1° no tempo zero para 17,4° em 3 minutos, queda de 21,3%. Assim como descrito por Caicedo e colaboradores (2019), uma maior molhabilidade, ou seja, um menor ângulo de contato pode estar relacionado com o maior número de sítios disponíveis na cadeia do amido para ligações de hidrogênio com a água, principalmente devido à falha de interação entre o plastificante e o amido durante a preparação do filme. Portanto, esse resultado contraditório para um óleo de natureza apolar, principalmente em concentrações elevadas como a 15%, pode ter ocorrido devido a separação de fases e formação de poros e descontinuidades superficiais (CAICEDO et al., 2019; SANTOS et al., 2025). Uma vez que o método da gota séssil considera uma superfície plana para fazer as medições, a água foi capaz

de penetrar e preencher os poros fazendo com que a gota se espalhasse e fosse absorvida rapidamente, resultando em uma leitura de ângulo de contato muito menor (WANG et al., 2025). Esse fenômeno é bem descrito no estudo de Wang et al. (2025) que avalia como a estrutura lipídica afeta hidrofobicidade de filmes de amido. Conforme a
Figura 33, existem diferentes arranjos de filmes à base de amido contendo lipídios: (a) estruturas uniformes com ácidos graxos bem homogeneizados em toda matriz, (b) estruturas heterogêneas com regiões de lipídios agregados dispersos na matriz de amido formando poros e (c) estruturas de bicamada formadas pela migração dos lipídios para as superfícies dos filmes. Segundo os autores, lipídios com cadeias alifáticas longas apresentam elevado impedimento estérico e menor compatibilidade, o que dificulta sua inserção e dispersão homogênea na matriz de amido, resultando em um arranjo heterogêneo composto de poros e regiões onde de óleo agregado, conforme esquema da
Figura 33(b). Como óleo de mamona é composto majoritariamente pelo triglicerídeo de ácido ricinoleico (que possui uma longa cadeia alifática de 18 carbonos), a sua adição em grandes concentrações pode levar a incompatibilidade e separação de fase, formando uma superfície irregular no filme que facilita o espalhamento da água.

Figura 33 – Esquema da distribuição de lipídeos na matriz de amido termoplástico



(a) estruturas uniformes; (b) estruturas heterogêneas; (c) estruturas de bicamada.
Fonte: Traduzido de WANG et al. (2025).

5.6 Taxa transmissão de vapor d'água

Os resultados encontrados no ensaio de taxa de transmissão de vapor d'água (WVT) são apresentados na Tabela 9 com a média das triplicatas e o respectivo desvio padrão.

Tabela 8 – Resultados do ensaio transmissão de vapor d'água

Amostra	WVT (g/h·m²)
TPS	9,93 ± 0,67
5% AT	10,89 ± 1,89
15% AT	15,54 ± 0,25
5% OM	9,35 ± 0,24
15% OM	6,64 ± 4,70
7,5% AT/OM	16,03 ± 0,07

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Analisando os resultados, observa-se que, comparado com a amostra padrão de TPS, não houve mudança significativa da taxa de transmissão de vapor d'água nas amostras de 5% AT, 5% OM e 15% OM, quando se considera os valores e os respectivos desvios padrões. O resultado destoante de desvio padrão da amostra de 15% OM se deve ao fato de que o ensaio para esta formulação foi realizado em duplicata, uma vez que precisou-se descartar uma amostra devido ao seu rompimento durante a execução do ensaio. No entanto, percebe-se uma tendência da diminuição da WVT com adição de OM e um aumento da WVT com adição de AT.

Ao avaliar a permeabilidade ao vapor d'água (WVP), propriedade diretamente proporcional à WVT, de filmes de TPS contendo diferentes concentrações de glicerol, Tarique e colaboradores (2021) verificaram um aumento da WVP. Com o aumento da concentração de glicerol de 15% para 45%, os valores passaram de 5.71×10^{-9} $gs^{-1}m^{-1}Pa^{-1}$ para 10.8×10^{-9} $gs^{-1}m^{-1}Pa^{-1}$. Em outro estudo de filmes PEBD/TPS, Jannatiha e colaboradores (2025) observaram um aumento da WVP nos filmes com AT e uma diminuição com a adição de OM. Os autores discutem que em maiores concentrações de ácido tartárico, a acidez do filme aumenta, o que leva a hidrólise ácida e resulta em: (i) aumento do número de grupos hidroxila livres que atuam como "sítios de adsorção" para a umidade, e (ii) atua como um plastificante que aumenta a mobilidade e o espaço entre as cadeias poliméricas. Portanto o menor ângulo de contato para a amostra de 15% AT, bem como a maior taxa de transmissão de vapor d'água (de 15,54 g/h·m² contra 9,93 g/h·m² do TPS) estão de acordo com os resultados descritos pelos autores.

Em contrapartida, a menor WVT obtida para o filme de 15% OM (6,64 g/h·m²) pode ter relação com o impedimento estérico e a longa cadeia alifática do ácido ricinoleico. Apesar do ângulo de contato ter diminuído para essa amostra, a WVT mede a capacidade do filme como um todo em reter o vapor d'água e não é uma propriedade de superfície como a molhabilidade. Portanto, conforme discutido anteriormente, as longas cadeias da estrutura do óleo de mamona, criam um

caminho tortuoso que atua impedindo que o vapor d'água atravesse o filme, assim diminuindo a WVT. A amostra de 7,5% AT/OM apresentou a maior WVT: 16,03 g/h·m². Esse resultado pode ser explicado pela hidrólise ácida proporcionada pelo AT, bem como pela maior concentração de grupos hidroxila fornecido pelo aumento da concentração de OM. Conforme proposto por Wang et al. (2025), a mistura de AT e OM pode ter levado à formação de estrutura heterogênea com poros, semelhante ao esquema da Figura 33(b), que criam caminhos facilitados para a passagem de vapor.

Em suma, os resultados revelam que a WVT é influenciada pela distribuição espacial dos aditivos na matriz de amido, apontando uma heterogeneidade dos filmes. Enquanto o óleo de mamona migrou para a superfície, impedindo a transmissão de vapor d'água, o ácido tartárico, por meio da hidrólise ácida, aumenta o volume livre e sítios de adsorção para a água. Não foi observado um efeito sinérgico para a mistura dos aditivos em termo de propriedade de barreira frente ao vapor d'água.

5.7 Ensaio de tração

As propriedades de limite de resistência à tração, ductilidade e módulo de elasticidade foram investigadas por meio do ensaio de tração. Os resultados estão apresentados na Tabela 9 com a média das triplicatas e o respectivo desvio padrão.

Tabela 9 – Resultados do ensaio de tração

Amostra	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Ductilidade (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
TPS	2,9 ± 0,4	11,0 ± 2,0	61 ± 10
5% AT	3,4 ± 1,1	5,4 ± 4,4	209 ± 87
15% AT	3,2 ± 1,1	11,0 ± 7,2	83 ± 12
5% OM	4,4 ± 1,2	6,4 ± 3,3	189 ± 67
15% OM	2,6 ± 1,3	5,3 ± 5,5	170 ± 67
7,5% AT/OM	1,6 ± 0,3	3,9 ± 0,1	84 ± 18

Fonte: AUTORIA PRÓPRIA, 2026.

Ao analisar os resultados, observa-se que os dados não apresentaram tendência clara, revelando que a incorporação de aditivos modificou o comportamento mecânico do material de forma complexa. Considerando os desvios padrões entre as amostras, torna-se difícil observar mudanças nas propriedades de limite de resistência à tração (LRT) e ductilidade, pois as amostras podem apresentar resultados muito semelhantes e ainda estarem dentro da faixa de

variação. Ademais, os altos desvios padrões apresentados também são indícios da heterogeneidade dos materiais, bem como da presença de defeitos, como microbolhas e trincas, que agem como concentradores de tensão durante o ensaio. Nessa ótica, conforme apontado por Wang et al. (2025), nem todas as moléculas do OM participaram da formação do filme de amido, o que permite a formação de fases distintas e acúmulo de moléculas ácido graxo em certas regiões e ajuda a explicar tais desvios.

A amostra de TPS, com LRT de 2,9 MPa, ductilidade de 11% e módulo de elasticidade de 61 MPa, exibiu um comportamento típico de um material plastificado com glicerol. Comparativamente, Tarique et al. (2021) obtiveram LRT de 2,42 MPa, ductilidade de 42,62% e módulo de elasticidade de 52,26 MPa para TPS de amido de araruta.

Jannatiha et al. (2025) relatam um aumento do LRT e da ductilidade com a incorporação de AT nas amostras, em comparação com o controle. Santos et al. (2025), por outro lado, observaram uma queda nas propriedades com o aumento da concentração de AT. Ambos os autores relatam que a melhora das propriedades em baixas concentrações de AT está ligada com a formação de ligações éster, observadas nos espectros de FTIR, o que leva a um aumento da interação do amido e aditivo, levando ao aumento da rigidez do material, refletida pelo aumento do módulo de elasticidade. Por outro lado, com o aumento da concentração de AT, o efeito plastificante é mais dominante, resultando em um material mais flexível. Com base nos dados da Tabela 9, pode-se levantar a mesma hipótese para as formulações contendo 5% e 15% de AT. Com a adição de 5% de AT, observou-se um aumento do LRT (3,4 MPa) e do módulo de elasticidade (209 MPa). Esse enrijecimento está correlacionado com as reações de esterificação identificadas por meio do espectro de FTIR, que restringem o movimento das cadeias poliméricas do amido e aumenta significativamente a rigidez. Por outro lado, o filme com 15% AT apresentou uma grande queda no módulo de elasticidade, de 40,2%, e aumento da ductilidade (11%), se o desvio padrão for considerado. A hidrólise ácida fragmentou as cadeias poliméricas, o que resultou na redução das forças intermoleculares e no aumento da mobilidade das cadeias.

Para as amostras com óleo de mamona, Jannatiha et al. (2025) concluiu que adicionar OM causou uma diminuição no LRT e um aumento na ductilidade o que foi atribuído à formação de ligações de hidrogênio entre o OM e o amido, devido à estrutura do ácido ricinoleico conforme discutido anteriormente. De acordo com os resultados obtidos, o filme com 5% OM obteve a maior LRT (4,4 MPa) e alto módulo de elasticidade (189 MPa), enquanto observou-se uma diminuição do LRT para 2,6 MPa na amostra de 15% OM ao passo que as demais propriedades não foram extensamente afetadas. A queda das propriedades na amostra

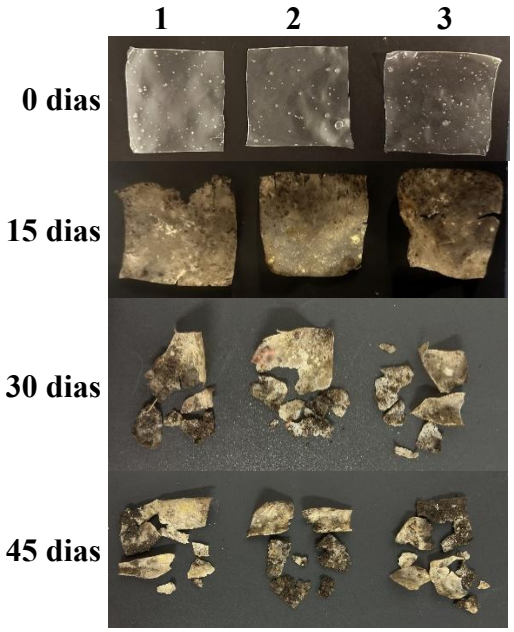
de 15% OM pode estar relacionada ao problema de dispersão e formação de poros e agregados de óleo que atua gerando descontinuidades na matriz de amido.

Por fim, a mistura de 7,5% AT/OM apresentou os piores resultados globais: LRT de 1,6 MPa e ductilidade de 3,9%. Este é mais um indicativo do efeito sinérgico negativo, em que a junção dos aditivos levou à problemas de dispersão e formação de estruturas heterogêneas com poros que impactaram na estrutura física do filme.

5.8 Ensaio de biodegradabilidade

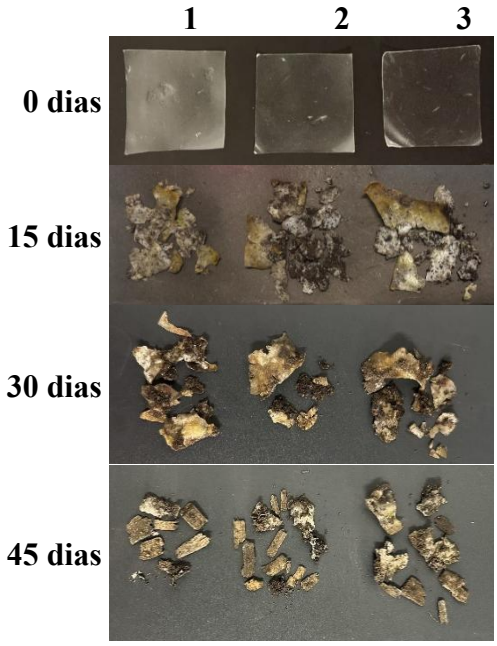
Os resultados do ensaio de biodegradação são apresentados nas Figura 35 à Figura 39.

Figura 34 – Biodegradação TPS



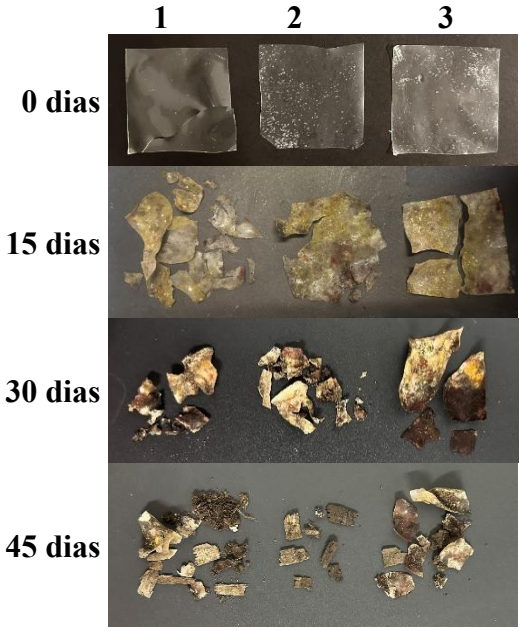
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 35 – Biodegradação 7,5% AT/OM



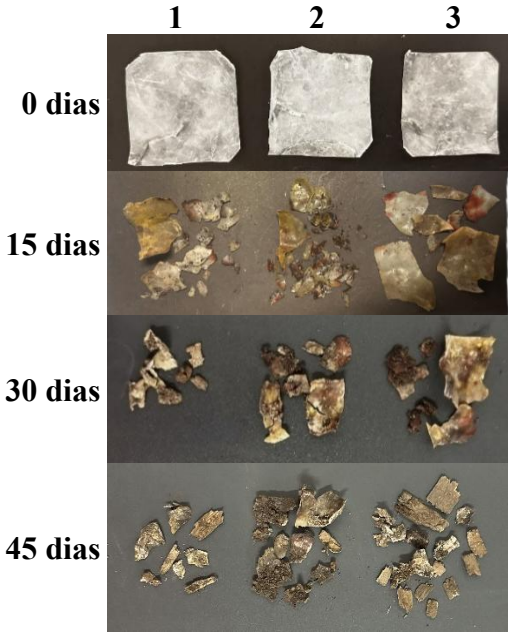
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 36 – Biodegradação 5% AT



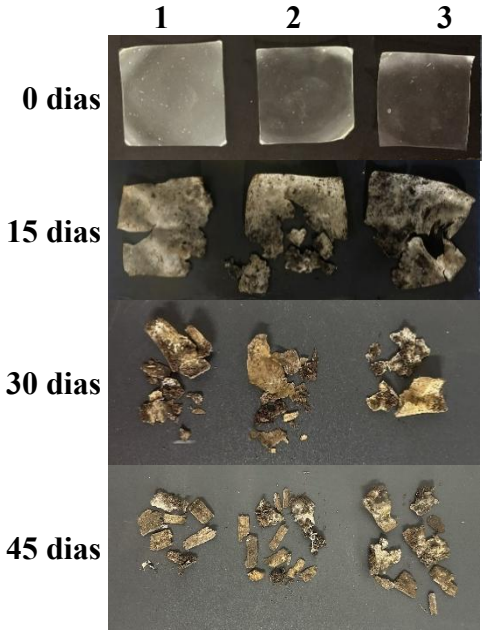
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 37 – Biodegradação 15% AT



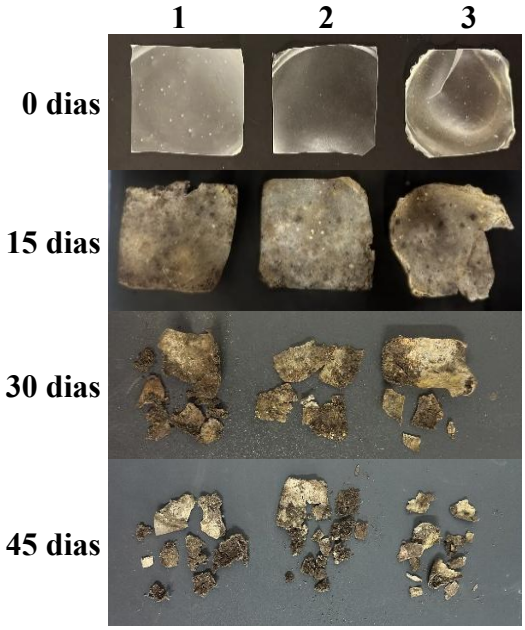
Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 38 – Biodegradação 5% OM



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Figura 39 – Biodegradação 15% OM



Fonte: Autoria Própria, 2026.

A biodegradação dos filmes de amido ocorre por meio do ataque da estrutura de amido por microrganismos o que leva à fragilização e quebra da estrutura do filme. Analisando os resultados, observa-se que todos os filmes sofreram biodegradação intensa com crescimento de fungos, mudança de coloração e elevada fragmentação. Embora não tenha sido possível avaliar

a diferença de degradação significativa dos filmes nos períodos de 30 e 45 dias, pode-se notar uma tendência de aceleração da biodegradabilidade nos filmes contendo ácido tartárico em comparação com o TPS e um resultado semelhante dos filmes contendo óleo de mamona com o TPS.

Estes resultados mostram correlação com os resultados de WVT. Uma vez que a ação microbiana é governada pela umidade para crescimento dos microrganismos, àqueles filmes que apresentam maior taxa de transmissão a vapor d'água, ou seja, filmes contendo ácido tartárico, são propensos à maior biodegradabilidade. Isso acontece devido à acidez do AT que promove a hidrólise ácida durante o processamento, na fragmentação da cadeia e na redução da massa molar, o que promove a penetração da água e facilita a colonização dos microrganismos, portanto, acelerando a perda de massa. Por outro lado, apesar de não ser um efeito significativo, a adição de óleo de mamona pode desacelerar a biodegradabilidade nos primeiros 15 dias devido às cadeias longas de ácido graxo que atuam impedindo a penetração da água.

Resultados semelhantes são reportados por Jannatiha e colaboradores (2025) que relatam que o aumento do teor de ácido tartárico resulta em uma maior perda de massa molar devido à acidez, o que promove e acelera o processo de biodegradação no solo, enquanto o aumento da concentração de óleo de mamona diminui a taxa de degradação devido à natureza hidrofóbica e às longas cadeias alifáticas do ácido graxo.

Esses resultados reforçam o potencial do amido termoplástico como um material que pode reduzir o impacto ambiental, poluição e emissões de dióxido de carbono dos plásticos convencionais de origem fóssil, uma vez que os aditivos incorporados, assim como amido, são de origem natural, e foram capazes de aceleram a biodegradação do filme com o passar do tempo.

6 CONCLUSÃO

A presente pesquisa avaliou a influência da mistura de diferentes concentrações de ácido tartárico e óleo de mamona nas propriedades de filmes de amido termoplástico a fim de contribuir para o desenvolvimento de bioplásticos sustentáveis como uma alternativa viável aos polímeros convencionais derivados do petróleo.

Foi possível preparar com sucesso filmes de TPS incorporando diferentes quantidades de AT (5% e 15%), OM (5% e 15%) e uma formulação mista (7,5% AT/OM) por meio do método *casting*. A avaliação visual demonstrou que os aditivos afetam diretamente o aspecto dos filmes, com redução da viscosidade da mistura e redução de bolhas. Ademais, foram caracterizadas as propriedades mecânicas, térmicas, estruturais, de superfície, de barreira e biodegradabilidade dos filmes, permitindo estabelecer a correlação entre o comportamento do filme e o respectivo aditivo adicionado.

Os resultados de FTIR indicaram, através do surgimento de bandas na região de 1720 cm^{-1} a 1740 cm^{-1} referentes ao estiramento da ligação C=O, que ocorreu esterificação em todas as formulações com aditivos. Além disso, foi possível concluir que a amostra com 15% AT apresentou um espectro mais distinto, sendo semelhante ao do ácido tartárico puro, indicando um excesso de AT no filme.

Não foi possível identificar a T_g dos filmes por meio do ensaio de DSC, mas a estabilidade térmica medida pelo ensaio de TGA mostrou que as amostras com OM apresentaram maior estabilidade térmica, devido ao impedimento estérico e ao número de hidroxilas na sua estrutura deste óleo. Por outro lado, a formação de ligações éster, termicamente menos estáveis e a fragmentação gerada pela hidrólise ácida do AT reduziram a temperatura de degradação térmica do filme.

Os ensaios de WVT e ângulo de contato revelaram resultados antagônicos entre si. Os resultados sugerem que as moléculas de OM migraram para a superfície dos filmes, em especial para aquele com maior concentração (15%), formando uma estrutura heterogênea, criando assim um caminho interno tortuoso, fato que diminuiu a WVT da amostra com 15% de OM, mas aumentou hidrofilicidade devido à e exposição as hidroxilas do ácido ricinoleico na superfície.

Por outro lado, as amostras com AT apresentaram maior WVT devido ao aumento do número de grupos hidroxila livres no meio e ao aumento da mobilidade cadeias poliméricas proporcionadas pela hidrólise ácida. Por outro lado, o ângulo de contato das amostras de 5% AT e 7,5% AT/OM foram maiores do que as amostras contendo OM. Isso indicou a esterificação

e formações de novas ligações químicas que conectam as cadeias poliméricas do amido, aumentando a hidrofobicidade. A queda do ângulo de contato na amostra de 15% AT está relacionada com à hidrolise ácida e maior número de hidroxilas disponíveis para a interação com as moléculas de água.

As propriedades mecânicas revelaram que, em baixas concentrações de AT, as propriedades são melhoradas e o aditivo atua como agente de reticulação para formação de ligações éster, mas com aumento da concentração de ácido, o efeito da mobilidade e interações intermoleculares das cadeias sobressai. De maneira análoga, menores concentrações de OM tendem a melhorar as propriedades mecânicas por meio das ligações de hidrogênio com a matriz de amido, mas maiores concentrações resultam em propriedades inferiores. A mistura dos aditivos não apresentou melhora das propriedades. Por fim, o ensaio de biodegradabilidade mostrou um aumento da taxa de biodegradação com a incorporação de AT e um potencial retardo nessa taxa nas amostras com 5% e 15% OM em 15 dias.

Em suma, ao analisar o potencial destes aditivos na obtenção de filmes de TPS, conclui-se que o ácido tartárico e o óleo de mamona são aditivos promissores. Contudo, o estudo mostrou que o resultado final depende do equilíbrio da formulação. Ademais, não houve um efeito sinérgico de melhoria das propriedades com a mistura dos aditivos. Para uma possível aplicação em embalagens, conclui-se que o óleo de mamona pode atuar como uma barreira hidrofóbica para prolongar a vida útil de embalagens frente à umidade e temperatura, enquanto o ácido tartárico apresenta-se como uma alternativa para melhorar a hidrofobicidade, biodegradabilidade e rigidez do filme. A compreensão desses mecanismos contribui para a engenharia de materiais, pois ajuda no desenvolvimento de materiais com propriedades que atendem aplicações industriais específicas.

REFERÊNCIAS

AHSAN, W. A.; HUSSAIN, A.; LIN, C.; NGUYEN, M. K. Biodegradation of Different Types of Bioplastics through Composting—A Recent Trend in Green Recycling. **Catalysts**, Basel, v. 13, n. 2, p. 294, 2023.

ALCÁZAR-ALAY, S. C.; MEIRELES, M. A. A. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 35, p. 215–236, 2015.

ANDRZEJEWSKI, J.; DAS, S.; LIPIK, V.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; YOU, X.; TAN, L. P.; CHANG, B. P. The Development of Poly(lactic acid) (PLA)-Based Blends and Modification Strategies: Methods of Improving Key Properties towards Technical Applications—Review. **Materials**, Basel, v. 17, n. 18, p. 4556, 2024.

ASTM E96/E96M. **Standard Test Methods for Gravimetric Determination of Water Vapor Transmission Rate of Materials**. 2022. Disponível em: <https://store.astm.org/e0096_e0096m-24.html>. Acesso em: 21 abr. 2026.

ASTM G160-12. **Standard Practice for Evaluating Microbial Susceptibility of Nonmetallic Materials By Laboratory Soil Burial**. 2019. Disponível em: <https://store.astm.org/g0160-12r19.html>. Acesso em: 21 abr. 2026.

ÁVILA-MARTÍN, L.; GUZMÁN SILVA, D. K.; PERILLA, J. E.; VILLA ZABALA, C. C. Preliminary Modeling Study of a Tape Casting System for Thermoplastic Starch Film Forming. **Biology and Life Sciences Forum**, Basel, v. 28, n. 1, p. 4, 2023.

CAICEDO, C.; AGUIRRE LOREDO, R. Y.; FONSECA GARCÍA, A.; OSSA, O. H.; VÁZQUEZ ARCE, A.; CALAMBÁS PULGARIN, H. L.; ÁVILA TORRES, Y. Rheological, Thermal, Superficial, and Morphological Properties of Thermoplastic Achira Starch Modified with Lactic Acid and Oleic Acid. **Molecules**, Basel, v. 24, n. 24, p. 4433, 2019.

CHANG, Q.; ZHENG, B.; ZHANG, Y.; ZENG, H. A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdã, v. 186, p. 163–173, 2021.

CHENG, H.; CHEN, L.; MCCLEMENTS, D. J.; YANG, T.; ZHANG, Z.; REN, F.; MIAO, M.; TIAN, Y.; JIN, Z. Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, Amsterdã, v. 114, p. 70–82, 2021.

CORRADINI, E.; DE MORAIS TEIXEIRA, E.; AUGUSTO MARCONDES AGNELLI, J.; HENRIQUE CAPPARELLI MATTOSO, L. Amido Termoplástico. Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, 30. São Carlos, SP, n. 1ª, Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, 30, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/30796/1/DOC302007.pdf>

DARIE-NIȚĂ, R. N.; IRIMIA, A.; GRIGORAȘ, V. C.; MUSTAȚĂ, F.; TUDORACHI, N.; RÂPĂ, M.; LUDWICZAK, J.; IWANCZUK, A. Evaluation of Natural and Modified Castor Oil Incorporation on the Melt Processing and Physico-Chemical Properties of Polylactic Acid. **Polymers**, Basel, v. 14, n. 17, p. 3608, 2022.

ESMAEILI, M.; PIRCHERAGHI, G.; BAGHERI, R.; ALTSTÄDT, V. Poly(lactic acid)/coplasticized thermoplastic starch blend: Effect of plasticizer migration on rheological and mechanical properties. **Polymers for Advanced Technologies**, Hoboken, v. 30, n. 4, p. 839–851, 2018.

GEBRESAS, G. A.; SZABÓ, T.; MAROSSY, K. A comparative study of carboxylic acids on the cross-linking potential of corn starch films. **Journal of Molecular Structure**, Amsterdã, v. 1277, p. 134886, 2023.

GLASER, S. J.; FAISAL, M.; BLENNOW, A.; LO LEGGIO, L. Additives as external plasticizers in starch-based bioplastics - towards improving the properties of food packaging: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdã, v. 335, p. 148754, 2026.

HAN, J. H.; LEE, J.; KIM, S. K.; KANG, D.; PARK, H. B.; SHIM, J. K. Impact of the Amylose/Amylopectin Ratio of Starch-Based Foams on Foaming Behavior, Mechanical Properties, and Thermal Insulation Performance. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, Washington, v. 11, n. 7, p. 2968–2977, 2023.

HORSTMANN, S. W.; LYNCH, K. M.; ARENDT, E. K. Starch Characteristics Linked to Gluten-Free Products. **Foods**, Basel, v. 6, n. 4, p. 29, 2017.

IMRE, B.; VILAPLANA, F. Organocatalytic esterification of corn starches towards enhanced thermal stability and moisture resistance. **Green Chemistry**, Cambridge, v. 22, n. 15, p. 5017–5031, 2020.

JANNATIHA, N.; SEDAGHAT, N.; RAZAVI, S. M. A. Effect of tartaric acid and castor oil on the characteristics of low-density polyethylene/thermoplastic starch composite films. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, Amsterdã, v. 11, p. 100898, 2025.

JHA, S.; AKULA, B.; ENYIOMA, H.; NOVAK, M.; AMIN, V.; LIANG, H. Biodegradable Biobased Polymers: A Review of the State of the Art, Challenges, and Future Directions. **Polymers**, Basel, v. 16, n. 16, p. 2262, 2024.

JIANG, T.; DUAN, Q.; ZHU, J.; LIU, H.; YU, L. Starch-based biodegradable materials: Challenges and opportunities. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, Amsterdã, v. 3, n. 1, p. 8–18, 2020.

JONES, F. Pesquisa FAFESP. **The promise of bioplastics**, [s. l.], n. 290, 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/en/the-promise-of-bioplastics/>. Acesso em: 2 nov. 2025.

LIU, R.; XU, C.; CONG, X.; WU, T.; SONG, Y.; ZHANG, M. Effects of oligomeric procyanidins on the retrogradation properties of maize starch with different amylose/amylopectin ratios. **Food Chemistry**, Amsterdã, v. 221, p. 2010–2017, 2017.

LIU, Y.; LIAO, L.; XIONG, J.; LIANG, Z. Thermal degradation behavior and structures of thermoplastic cassava starch/sisal fiber composites. **Polymer Composites**, Hoboken, v. 43, n. 4, p. 2022–2033, 2022.

MALAFATTI, J. O. D.; RUELLAS, T. M. D. O.; SCHILDT, L. F. L.; DOMINGUES, M. Á.; MARINHO, B. S.; MEIRELLES, M. R.; PARIS, E. C. PROPRIEDADES MECÂNICAS DE

FILMES DE AMIDO TERMOPLÁSTICO NA PRESENÇA DE UREIA. Em: **A Geração de Novos Conhecimentos na Química 2**. 1. ed. [s.l.] : Atena Editora, 2021. p. 237–249.

MAZIDI, M. M.; AREZOUMAND, S.; ZARE, L. Research progress in fully biorenewable tough blends of polylactide and green plasticizers. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdã, v. 279, p. 135345, 2024.

MOHAMMED, A. A. B. A.; HASAN, Z.; OMRAN, A. A. B.; KUMAR, V. V.; ELFAGHI, A. M.; ILYAS, R. A.; SAPUAN, S. M. Corn: Its Structure, Polymer, Fiber, Composite, Properties, and Applications. **Polymers**, Basel, v. 14, n. 20, p. 4396, 2022.

MOJICA-MUÑOZ, D. M.; MACÍAS-SÁNCHEZ, K. L.; JUÁREZ-HERNÁNDEZ, E. O.; RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ, A.; GRÉVY, J.-M.; DÍAZ-VALLE, A.; CARRILLO-TRIPP, M.; FALCÓN-GONZÁLEZ, J. M. Optimizing biodegradable plastics: Molecular dynamics insights into starch plasticization with glycerol and oleic acid. **Journal of Molecular Graphics and Modelling**, Amsterdã, v. 126, p. 108674, 2024.

MONTILLA-BUITRAGO, C. E.; GÓMEZ-LÓPEZ, R. A.; SOLANILLA-DUQUE, J. F.; SERNA-COCK, L.; VILLADA-CASTILLO, H. S. Effect of Plasticizers on Properties, Retrogradation, and Processing of Extrusion-Obtained Thermoplastic Starch: A Review. **Starch - Stärke**, Hoboken, v. 73, n. 9–10, p. 2100060, 2021.

MORENO-BOHORQUEZ, E.; ARIAS-TAPIA, M. J.; JARAMILLO, A. F. Recent Advances in Thermoplastic Starch (TPS) and Biodegradable Polyester Blends: A Review of Compatibilization Strategies and Bioactive Functionalities. **Polymers**, Basel, v. 18, n. 2, p. 289, 2026.

MULLER, J.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; CHIRALT, A. Combination of Poly(lactic) Acid and Starch for Biodegradable Food Packaging. **Materials**, Basel, v. 10, n. 8, p. 952, 2017.

NIST CHEMISTRY WEBBOOK. **Glycerin**. [s.d.]. Disponível em: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=56-81-5>. Acesso em: 16 maio. 2026a.

NIST CHEMISTRY WEBBOOK. **(R,R)-Tartaric acid**. [s.d.]. Disponível em: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C87694&Mask=80>. Acesso em: 13 maio. 2026b.

OECD. **Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. 2022. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_de747aef-en.html>. Acesso em: 22 out. 2025.

OJOGBO, E.; OGUNSONA, E. O.; MEKONNEN, T. H. Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials. **Materials Today Sustainability**, Amsterdã, v. 7–8, p. 100028, 2020.

OLIVATO, J. B.; NOBREGA, M. M.; MÜLLER, C. M. O.; SHIRAI, M. A.; YAMASHITA, F.; GROSSMANN, M. V. E. Mixture design applied for the study of the tartaric acid effect on starch/polyester films. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdã, v. 92, n. 2, p. 1705–1710, 2013.

OLIVEIRA, J. S. De; OLIVEIRA, J. P. De; OLIVEIRA, C. P. De; VELOSO, C. M. Trends and developments of starch-based biodegradable polymer blends for use as food packaging with a focus on thermal stability: bibliometric, scientometric, and qualitative analyses from

2019 to 2024. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdã, v. 339, p. 149891, 2026.

PALUCH, M.; OSTROWSKA, J.; TYŃSKI, P.; SADURSKI, W.; KONKOL, M. Structural and Thermal Properties of Starch Plasticized with Glycerol/Urea Mixture. **Journal of Polymers and the Environment**, Berlim, v. 30, n. 2, p. 728–740, 2022.

PESARANHAJIABBAS, E.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Recent progress on biodegradable polylactic acid based blends and their biocomposites: A comprehensive review. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdã, v. 253, p. 126231, 2023.

PILAPITIYA, P. G. C. N. T.; RATNAYAKE, A. S. The world of plastic waste: A review. **Cleaner Materials**, Amsterdã, v. 11, p. 100220, 2024.

POOJA, N.; BANIK, S.; CHAKRABORTY, I.; SUDEEKSHA, H. C.; MAL, S. S.; SRISUNGSITTHISUNTI, P.; PATIL, A.; MAHATO, K. K.; MAZUMDER, N. Comparative analysis of biopolymer films derived from corn and potato starch with insights into morphological, structural and thermal properties. **Discover Sustainability**, Berlim, v. 5, n. 1, p. 467, 2024. a.

POOJA, N.; S, S.; SINGH, B. N.; MAZUMDER, N. Advancing sustainable bioplastics: chemical and physical modification of starch films for enhanced thermal and barrier properties. **RSC Advances**, Cambridge, v. 14, n. 33, p. 23943–23951, 2024. b.

RAHARDIYAN, D.; MOKO, E. M.; TAN, J. S.; LEE, C. K. Thermoplastic starch (TPS) bioplastic, the green solution for single-use petroleum plastic food packaging – A review. **Enzyme and Microbial Technology**, Amsterdã, v. 168, p. 110260, 2023.

ROMEIRA, K. M.; ABDALLA, G.; GONÇALVES, R. P.; PEGORIN, G. S.; DE AZEREDO, H. M. C.; MUSSAGY, C. U.; HERCULANO, R. D. Residual Starch Packaging Derived from Potato Washing Slurries to Preserve Fruits. **Food and Bioprocess Technology**, Berlim, v. 14, n. 12, p. 2248–2259, 2021.

SANTOS, L. M.; DOS S. MATUSINHO, I. A.; ROA, J. P. B.; DE SOUZA, P. P.; DE O. PATRICIO, P. S. Evaluation of the effects of organic acids on the properties of thermoplastic starch. **Polymer Bulletin**, Berlim, v. 82, n. 8, p. 3063–3083, 2025.

SCHLEMMER, D.; SALES, M. J. A. Thermoplastic starch films with vegetable oils of Brazilian Cerrado. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Berlim, v. 99, n. 2, p. 675–679, 2010.

SUN, S.; WENG, Y.; ZHANG, C. Recent advancements in bio-based plasticizers for polylactic acid (PLA): A review. **Polymer Testing**, Amsterdã, v. 140, p. 108603, 2024.

SURENDREN, A.; MOHANTY, A. K.; LIU, Q.; MISRA, M. A review of biodegradable thermoplastic starches, their blends and composites: recent developments and opportunities for single-use plastic packaging alternatives. **Green Chemistry**, Cambridge, v. 24, n. 22, p. 8606–8636, 2022.

TARIQUE, J.; SAPUAN, S. M.; KHALINA, A. Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (Maranta arundinacea) starch biopolymers. **Scientific Reports**, Berlim, v. 11, n. 1, p. 13900, 2021.

VILLADIEGO, K.; ARIAS TAPIA, M. J.; USECHE, J.; ESCOBAR MACÍAS, D. Thermoplastic Starch (TPS)/Polylactic Acid (PLA) Blending Methodologies: A Review. **Journal of Polymers and the Environment**, Berlim, v. 30, n. 1, p. 75–91, 2022.

VOLPE, V.; DE FEO, G.; DE MARCO, I.; PANTANI, R. Use of sunflower seed fried oil as an ecofriendly plasticizer for starch and application of this thermoplastic starch as a filler for PLA. **Industrial Crops and Products**, Amsterdã, v. 122, p. 545–552, 2018.

WANG, J.; SUN, S.; RASHID, A.; MCCLEMENTS, D. J.; DING, X.; HOU, H.; KONG, L.; SUN, C.; WANG, W. Impact of fatty acid chain length and content on hydrophobicity of starch films: Structure-property analysis. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdã, v. 315, p. 144563, 2025.

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

YANG, J.; WANG, Z.; REN, J.; LIN, X.; ZHAO, J.; JIANG, X.; CHEN, Y. Molecular dynamics simulation and properties of thermoplastic starch -- effect of water content on starch plasticization. **Polymer**, Amsterdã, v. 290, p. 126571, 2024.

YU, L.; CHRISTIE, G. Measurement of starch thermal transitions using differential scanning calorimetry. **Carbohydrate Polymers**, Amsterdã, v. 46, n. 2, p. 179–184, 2001.

ZHAO, X.; CORNISH, K.; VODOVOTZ, Y. Narrowing the Gap for Bioplastic Use in Food Packaging: An Update. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 54, n. 8, p. 4712–4732, 2020.

ZHENG, J.; SUH, S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. **Nature Climate Change**, Berlim, v. 9, n. 5, p. 374–378, 2019.