

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

BRUNA OLIVEIRA DOS SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE POLÍMEROS UTILIZADOS EM EMBALAGENS
COSMÉTICAS: BIOPLÁSTICOS, POLÍMEROS RECICLADOS E SUAS
PROPRIEDADES DE BARREIRA E DURABILIDADE

UBERLÂNDIA, 2026

BRUNA OLIVEIRA DOS SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE POLÍMEROS UTILIZADOS EM EMBALAGENS
COSMÉTICAS: BIOPLÁSTICOS, POLÍMEROS RECICLADOS E SUAS
PROPRIEDADES DE BARREIRA E DURABILIDADE

Trabalho de Projeto de Pesquisa (TCC)
apresentado ao curso de graduação em
Engenharia Química, pela Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito para
obtenção de título de bacharel.

Orientador(a): Vicelma Luiz Cardoso

UBERLÂNDIA, 2026

BRUNA OLIVEIRA DOS SANTOS

ANÁLISE COMPARATIVA DE POLÍMEROS UTILIZADOS EM EMBALAGENS
COSMÉTICAS: BIOPLÁSTICOS, POLÍMEROS RECICLADOS E SUAS
PROPRIEDADES DE BARREIRA E DURABILIDADE

Trabalho de Projeto de Pesquisa (TCC)
apresentado ao curso de graduação em
Engenharia Química, pela Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito para
obtenção de título de bacharel.

Orientador(a): Vicelma Luiz Cardoso

Uberlândia, 18 de março de 2026.

Prof.^a Dra. Vicelma Luiz Cardoso (Orientadora)
Doutora e Pós-doutora – FEQUI/UFU

Prof.^a Dra. Flávia Roberta Diamantino Dutra
Doutora – FEQUI/UFU

Prof. Dr. José Vaz Pinheiro Neto
Doutor – FEQUI/UFU

RESUMO

O presente projeto de pesquisa busca analisar comparativamente o desempenho de polímeros utilizados em embalagens cosméticas, com ênfase em bioplásticos e polímeros reciclados, a partir de suas propriedades de barreira e durabilidade. A pesquisa será conduzida por meio de uma abordagem qualitativa, exploratória e bibliográfica, com a coleta de dados em bases científicas reconhecidas. Serão investigadas as características funcionais, estéticas e ambientais exigidas para embalagens no setor cosmético, bem como as propriedades físico-químicas dos materiais analisados. A partir disso, será realizada uma análise técnica comparativa com base em parâmetros extraídos da literatura, como permeabilidade a gases e resistência mecânica, visando avaliar a viabilidade técnica e sustentável desses materiais como alternativas ao plástico convencional. Espera-se que os resultados obtidos subsidiem escolhas mais conscientes e contribuam para a adoção de práticas alinhadas à economia circular no setor de cosméticos.

Palavras-chave: bioplásticos, polímeros reciclados, embalagens cosméticas, sustentabilidade.

RESUMO

This research project aims to comparatively analyze the performance of polymers used in cosmetic packaging, with an emphasis on bioplastics and recycled polymers, based on their barrier properties and durability. The study will be conducted using a qualitative, exploratory, and bibliographic approach, with data collected from recognized scientific databases. The functional, aesthetic, and environmental requirements for packaging in the cosmetics sector will be investigated, as well as the physicochemical properties of the materials analyzed. Based on this, a technical comparative analysis will be carried out using parameters extracted from the literature, such as gas permeability and mechanical resistance, in order to evaluate the technical and sustainable feasibility of these materials as alternatives to conventional plastics. It is expected that the results will support more informed material selection and contribute to the adoption of practices aligned with the circular economy in the cosmetics sector.

Keywords: bioplastics, recycled polymers, cosmetic packaging, sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das embalagens.....	14
Figura 2 – Relação entre o ciclo de vida do produto e da embalagem.....	19
Figura 3 – Classificação dos bioplásticos.....	25
Figura 4 – Fluxograma do caminho dos resíduos sólidos na reciclagem.....	31
Figura 5 – Simbologia de polímeros.....	33
Figura 6 – Processo de conscientização quanto ao uso do plástico.....	37
Figura 7 – Produção mundial de plásticos em 2021.....	38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de bioplásticos e suas definições.....	24
Quadro 2 – Os plásticos da engenharia.....	27
Quadro 3 – Categorias das reciclagens de polímeros.....	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVO GERAL	11
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	EMBALAGENS	12
2.1.1	Meio ambiente e marketing verde	14
2.1.2	Logística reversa	18
2.2	ALTERNATIVAS AO PLÁSTICO CONVENCIONAL	19
2.2.1	Bioplásticos	21
2.2.2	Polímeros reciclados	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	TIPO E ABORDAGEM DA PESQUISA	34
3.2	PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS	34
3.3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO.....	35
3.4	ANÁLISE COMPARATIVA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	PANORAMA DA PRODUÇÃO, USO E GESTÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOSV	36
4.2	POLÍMEROS RECICLADOS E RECICLAGEM MECÂNICA	37
4.3	BIOPLÁSTICOS: POTENCIAL, LIMITAÇÕES E DESAFIOS DA DIFUSÃO	38
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA E IMPLICAÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE	39
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

Nas prateleiras de farmácias e lojas de cosméticos, a embalagem frequentemente desempenha papel decisivo na percepção e na escolha do consumidor. Cores vibrantes, texturas sofisticadas e formatos diferenciados têm papel fundamental na decisão de compra. No entanto, por trás dessa função estética e comercial, existe uma estrutura técnica que precisa atender a requisitos de proteção, conservação e logística. Neste cenário, a escolha do material utilizado na embalagem se torna um ponto crítico, especialmente em uma indústria que movimenta bilhões e que, cada vez mais, é pressionada por questões ambientais e sociais (Pereira, 2025).

A sustentabilidade deixou de ser um diferencial e passou a ser uma exigência do mercado. Dessa forma, surge a necessidade de aliar desempenho técnico e responsabilidade ambiental no desenvolvimento de produtos. No caso das embalagens cosméticas, os polímeros reciclados e os bioplásticos surgem como alternativas promissoras ao plástico convencional. No entanto, há ainda muitas dúvidas sobre suas reais propriedades, limitações e viabilidade de aplicação. Assim, é necessário propor soluções mais sustentáveis para o setor (Queiroz; Jabota, 2024).

O Brasil tem se destacado como um dos maiores geradores de resíduos plásticos do mundo, sendo grande parte deles derivada de embalagens descartáveis, produzindo cerca de 10,33 Mt (10,33 milhões de toneladas) de resíduos plásticos por ano (Alencar *et al.*, 2023). No setor cosmético, o aumento do consumo de produtos embalados intensifica esse cenário, evidenciando a necessidade de alternativas que reduzam impactos ambientais sem comprometer a proteção e durabilidade dos produtos. Nesse contexto, a engenharia de materiais e o desenvolvimento de polímeros alternativos se tornam estratégicos para a criação de soluções que conciliem eficiência técnica e responsabilidade socioambiental.

A adoção de práticas de reaproveitamento e reciclagem tem se mostrado essencial para mitigar os impactos ambientais associados às embalagens. Materiais recicláveis e bioplásticos podem possibilitar a reinserção dos resíduos na cadeia produtiva, promovendo a economia circular e reduzindo a demanda por recursos naturais não renováveis. Ao mesmo tempo, essas práticas incentivam a indústria a pensar em embalagens com maior durabilidade, menor consumo de material e possibilidade de reutilização, reforçando a importância de um ciclo de vida mais sustentável para os produtos (Yadav *et al.*, 2024).

O comportamento do consumidor tem se mostrado um fator determinante no sucesso de soluções mais sustentáveis. Cada vez mais, os clientes valorizam produtos que, além de funcionais e esteticamente atraentes, sejam ambientalmente responsáveis. Essa mudança de hábito pressiona a indústria a investir em inovação, desenvolvendo materiais que ofereçam desempenho técnico adequado e, simultaneamente, reduzam os impactos ambientais. Assim, a sustentabilidade passa a ser parte do valor percebido pelo consumidor, influenciando decisões de compra e fortalecendo a competitividade das empresas (Testa *et al.*, 2022).

Do ponto de vista do design de embalagens, é fundamental que os projetos considerem não apenas a estética e a proteção do produto, mas também a eficiência do sistema como um todo. A combinação de embalagens primárias, secundárias e terciárias deve ser pensada para otimizar o uso de materiais, reduzir desperdícios e facilitar o transporte e armazenamento. A escolha de materiais recicláveis ou biodegradáveis, aliada à reutilização sempre que possível, garante maior circularidade, prolonga a vida útil das embalagens e contribui para práticas industriais mais responsáveis e sustentáveis (Pathan; Aurisicchio, 2025).

Diante da crescente demanda por embalagens sustentáveis no setor cosmético, surge o seguinte problema de pesquisa: quais são as diferenças de desempenho entre bioplásticos e polímeros reciclados em termos de propriedades de barreira e durabilidade?

A escolha deste tema está relacionada à necessidade de compreender como a engenharia pode contribuir para práticas mais sustentáveis sem comprometer a eficiência técnica. A indústria cosmética representa um campo fértil para inovação, mas ainda enfrenta entraves relacionados à confiabilidade de novos materiais. Ao investigar e comparar alternativas ao plástico convencional, este trabalho pretende oferecer subsídios técnicos para tomadas de decisão mais conscientes e alinhadas com os princípios da economia circular. Além disso, o tema permite a integração entre teoria e prática, oferecendo uma oportunidade de aplicar conceitos de materiais, processos e análise de desempenho a um problema real.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral analisar comparativamente o desempenho de polímeros utilizados em embalagens cosméticas, com foco em bioplásticos e polímeros reciclados, considerando suas propriedades de barreira e durabilidade.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para auxiliar o alcance do objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- investigar o papel das embalagens na indústria cosmética, com foco em requisitos funcionais, estéticos e ambientais;
- caracterizar os principais tipos de bioplásticos e polímeros reciclados utilizados na fabricação de embalagens, destacando suas propriedades físico-químicas, aplicabilidades e limitações;
- realizar uma análise comparativa entre bioplásticos e polímeros reciclados quanto às propriedades de barreira e durabilidade, avaliando sua viabilidade técnica e sustentável.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho tem como objetivo apresentar os conceitos técnicos e científicos necessários para a compreensão do uso de polímeros em embalagens cosméticas, com ênfase nas propriedades de barreira e durabilidade dos materiais.

2.1 EMBALAGENS

As embalagens desempenham múltiplas funções ao longo do ciclo de vida dos produtos, atuando na proteção do conteúdo, na facilitação do transporte e da estocagem, na padronização das quantidades comercializadas e na promoção da visibilidade no ponto de venda. Além disso, influenciam diretamente a experiência do usuário e viabilizam a distribuição em larga escala, tornando-se elementos estratégicos na interface entre produto e consumidor. Contudo, após o consumo, a embalagem pode assumir um papel negativo ao ser associada ao desperdício de materiais, especialmente quando não são adotadas práticas adequadas de reaproveitamento ou reciclagem, o que reforça a importância do desenvolvimento de soluções mais sustentáveis para esse componente do produto (Zeni, 2024).

As embalagens desempenham papel fundamental ao longo de toda a cadeia produtiva, exercendo funções que vão além da proteção e do acondicionamento dos produtos. Do ponto de vista do consumidor e da logística, aspectos como segurança, conservação, transporte e comunicação tornam-se cada vez mais relevantes, especialmente diante da crescente preocupação com a sustentabilidade. Nesse contexto, a responsabilidade pelos impactos ambientais associados às embalagens passa a ser compartilhada entre fabricantes, distribuidores, comerciantes e usuários, reforçando a necessidade de escolhas mais conscientes quanto aos materiais e aos processos envolvidos em sua produção e descarte (Silva et al., 2021).

Sob a ótica da sustentabilidade, o desenvolvimento de projetos de embalagens deve priorizar a redução ou racionalização dos diferentes níveis empregados ao longo da cadeia logística, considerando que muitos desses componentes apresentam vida útil curta e, frequentemente, não são produzidos a partir de práticas ambientalmente adequadas. A multiplicidade de camadas pode comprometer o desempenho ambiental

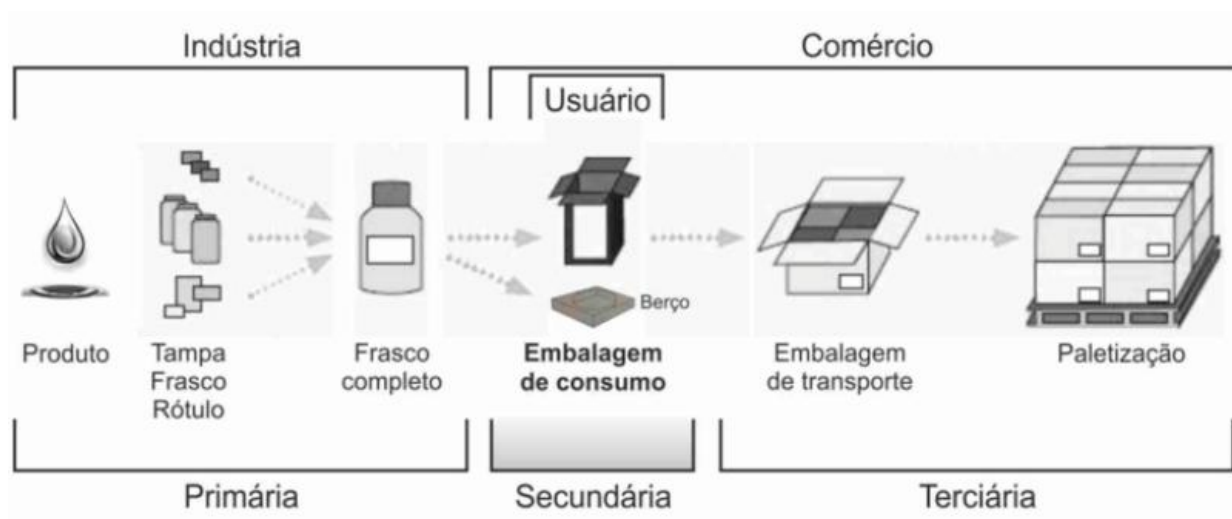
do sistema, influenciando negativamente aspectos como o gerenciamento de resíduos e a eficiência no transporte, especialmente no que se refere à taxa de ocupação volumétrica e ao consumo energético associado (Zeni, 2024).

A percepção dos consumidores quanto às práticas ambientais relacionadas às embalagens tem apresentado um nível de conscientização considerado médio a elevado, refletido na adoção frequente de hábitos associados à sustentabilidade. O fortalecimento do debate ambiental em escala global tem contribuído para tornar os consumidores mais atentos aos impactos de suas escolhas de consumo. Contudo, apesar dessa maior sensibilização, fatores como preço e conveniência continuam exercendo influência predominante no momento da decisão de compra, indicando que a consciência ambiental declarada nem sempre se traduz em comportamento efetivo alinhado a práticas sustentáveis (Valle; Guarnieri e Filippi, 2022).

Segundo Zeni (2024), a avaliação das funções das embalagens deve ser realizada de forma sistêmica, considerando o desempenho conjunto dos diferentes níveis envolvidos. A proteção do produto, por exemplo, não precisa ser atribuída exclusivamente à embalagem primária, podendo ser redistribuída entre os demais níveis conforme as condições logísticas e de uso. Essa abordagem permite otimizar o uso de materiais e favorece estratégias como a reutilização de embalagens secundárias e terciárias, contribuindo para a extensão da vida útil dos componentes e para a promoção de modelos baseados na circularidade dos materiais.

De modo geral, as embalagens podem ser classificadas em primárias, secundárias e terciárias, de acordo com sua função ao longo da cadeia de distribuição. As embalagens primárias são aquelas diretamente associadas ao envase do produto, incluindo componentes como frascos, tampas e rótulos, desempenhando papel fundamental na proteção, conservação e identificação do conteúdo. As embalagens secundárias correspondem às unidades de consumo, sendo destinadas ao contato com o usuário final e à exposição nos pontos de venda. Já as embalagens terciárias têm como principal função facilitar o transporte e a logística, reunindo e organizando as embalagens primárias e secundárias, garantindo maior eficiência no manuseio, armazenamento e distribuição dos produtos (Zeni, 2024). A Figura 1 demonstra, de forma visual, a classificação das embalagens.

Figura 1 - Classificação das embalagens



Fonte: Zeni (2024).

Apesar de grande parte das embalagens não ser projetada para reutilização, observa-se um esforço crescente por parte da indústria na valorização dos resíduos gerados após o consumo. A reciclagem desses materiais permite que deixem de ser classificados como rejeitos, passando a atuar como fontes secundárias de matéria-prima para a fabricação de novos produtos. Sob a ótica da Engenharia Química, esse processo envolve desafios relacionados à coleta, separação e reprocessamento dos materiais, além da preservação de propriedades que viabilizem sua reinserção em aplicações tecnicamente adequadas (Silva *et al.*, 2021).

2.1.1 Meio ambiente e marketing verde

Diante dos desafios ambientais contemporâneos, torna-se indispensável a adoção de estratégias capazes de reduzir os impactos associados aos padrões atuais de produção e consumo. Essas estratégias abrangem desde ações de educação e conscientização ambiental até a revisão de hábitos de consumo caracterizados pelo uso excessivo de recursos naturais. Nesse contexto, a indústria passa a desempenhar papel central na proposição de soluções técnicas que conciliem desempenho funcional dos produtos e menor impacto ambiental ao longo de seu ciclo de vida (Balieiro, 2022).

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, estabelecido pela Organização das Nações Unidas, está diretamente relacionado à necessidade de promover padrões de consumo e produção mais responsáveis, considerando os impactos ambientais associados ao uso de recursos naturais, à geração de resíduos e ao emprego de substâncias químicas ao longo do ciclo de vida dos produtos. No contexto industrial, esse objetivo incentiva a adoção de práticas que integrem eficiência produtiva, redução de impactos ambientais e responsabilidade social, aspectos particularmente relevantes para setores que utilizam materiais poliméricos, como a indústria de embalagens cosméticas (ONU, 2016).

A eficiência dos sistemas de reciclagem está diretamente relacionada à qualidade da segregação dos resíduos na fonte geradora. A separação inadequada e a presença de contaminantes nos materiais descartados comprometem as etapas posteriores de triagem e reprocessamento, reduzindo a viabilidade técnica e econômica da reciclagem. Para materiais poliméricos, essa contaminação pode resultar em degradação das propriedades físicas e químicas, limitando sua aplicação em novos produtos e afetando o volume efetivamente reinserido na cadeia produtiva (Balieiro, 2022).

Segundo a ONU (2026), destacam-se as principais metas associadas ao ODS 12 e sua relação com a gestão sustentável de produtos e resíduos:

- Meta 12.4 - Promoção do manejo ambientalmente adequado de produtos químicos e resíduos ao longo de todo o seu ciclo de vida, com foco na redução das emissões e liberações para o ar, a água e o solo, de modo a minimizar riscos à saúde humana e aos ecossistemas;
- Meta 12.5 - Redução significativa da geração de resíduos por meio de estratégias de prevenção, diminuição do consumo de materiais, ampliação das taxas de reciclagem e incentivo ao reuso, contribuindo para a eficiência no uso de recursos e para a economia circular;
- Meta 12.6 - Estímulo à adoção de práticas empresariais sustentáveis, especialmente por grandes organizações, incluindo a incorporação de indicadores e informações ambientais nos processos de gestão e nos relatórios corporativos;
- Meta 12.7 - Incentivo à implementação de políticas de compras públicas sustentáveis, alinhadas às prioridades nacionais, promovendo a demanda

por produtos e serviços com menor impacto ambiental ao longo de seu ciclo de vida.

A crescente valorização de critérios ambientais por parte dos consumidores tem impulsionado o desenvolvimento e a oferta de produtos classificados como ambientalmente responsáveis. Esses produtos mantêm suas funções essenciais, porém são concebidos de modo a minimizar impactos ambientais, considerando aspectos como a redução no uso de matérias-primas, maior eficiência energética, aumento da durabilidade e otimização das embalagens. Sob a perspectiva da Engenharia Química, tais princípios estimulam o emprego de materiais renováveis, reciclados ou reutilizáveis, bem como o aprimoramento de formulações e processos produtivos que atendam simultaneamente às exigências técnicas, ambientais e de mercado (Balieiro, 2022).

A preocupação com os impactos ambientais tem levado as empresas a ampliar a análise do ciclo de vida de seus produtos, considerando não apenas as etapas de produção e consumo, mas também o destino dos materiais utilizados. Esse movimento é evidenciado pelo aumento de iniciativas voltadas à reciclagem e pela busca por alternativas mais sustentáveis, especialmente no que se refere aos materiais empregados em embalagens. Nesse cenário, a avaliação do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida torna-se uma ferramenta estratégica para a redução de impactos e para a otimização do uso de recursos naturais (Silva *et al.*, 2021).

As embalagens sustentáveis representam uma alternativa ambientalmente responsável, sendo desenvolvidas a partir de materiais orgânicos ou recicláveis e com processos produtivos que demandam menor consumo de energia e recursos naturais. Além disso, sua concepção deve garantir que o descarte gere impactos ambientais mínimos, mensuráveis por meio de ferramentas como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). A sustentabilidade no desenvolvimento de embalagens envolve a integração de três pilares fundamentais: social, econômico e ambiental. Dessa forma, requer atenção a aspectos estratégicos que aumentem a eficiência do uso de recursos, favoreçam o reaproveitamento e a reciclagem, e minimizem a geração de resíduos (Silva *et al.*, 2021).

Segundo Silva *et al.* (2021), entre os principais pontos a serem considerados na produção de embalagens sustentáveis destacam-se:

- Economia de recursos na produção - análise detalhada de cada componente da embalagem para otimizar a utilização de matérias-primas;
- Possibilidade de reaproveitamento - extensão da vida útil dos materiais, reduzindo a geração de resíduos;
- Favorecimento da reciclagem - projeto que permite a fácil recuperação e reinserção dos materiais no ciclo produtivo, com boa relação custo/benefício;
- Facilidade de decomposição - escolha de materiais biodegradáveis para minimizar impactos ambientais após o descarte;
- Ajuste de quantidades para o consumo - dimensionamento adequado que contribua para a redução do desperdício de produto;
- Exemplos de materiais sustentáveis - papel reciclado, plásticos biodegradáveis e outros polímeros de baixo impacto ambiental, que permitem maior economia de energia e maximização do valor das matérias-primas.

Segundo Silva *et al.* (2021), a consolidação da consciência ecológica no contexto contemporâneo tem exigido das organizações uma postura que vá além do discurso institucional, demandando a efetiva incorporação de princípios de responsabilidade ambiental, social, cultural e econômica em suas estratégias produtivas. Nesse cenário, a valorização de produtos sustentáveis, frequentemente associados a certificações e selos ambientais, reflete uma mudança no perfil do consumidor, que passa a considerar não apenas o desempenho funcional, mas também os impactos gerados ao longo do processo produtivo.

O aumento do nível de exigência da sociedade em relação à sustentabilidade tem impulsionado as empresas a revisar seus modelos de negócio e práticas de mercado. A busca por transparência quanto à origem dos materiais, às tecnologias empregadas e aos impactos ambientais envolvidos tem fortalecido o uso do marketing ambiental como ferramenta estratégica, desde que associado a ações concretas de responsabilidade socioambiental. Dessa forma, a competitividade empresarial passa a estar vinculada à capacidade de desenvolver produtos que atendam às demandas dos consumidores sem comprometer os recursos naturais, promovendo um equilíbrio

entre desempenho técnico, viabilidade econômica e preservação ambiental (Silva *et al.*, 2021).

2.1.2 Logística reversa

A estruturação da logística reversa no Brasil aplicada às embalagens ocorreu de forma gradual, impulsionada inicialmente por iniciativas do poder público, como o decreto N° 10.936, de 12 de janeiro de 2022, e consolidada a partir de acordos setoriais firmados com os diversos agentes da cadeia produtiva. Esse processo envolveu discussões técnicas e institucionais relacionadas à adaptação de sistemas já existentes, bem como à definição de responsabilidades entre fabricantes, distribuidores, comerciantes e demais atores envolvidos na gestão dos resíduos pós-consumo. A complexidade desse arranjo evidenciou a necessidade de integrar diferentes modelos operacionais e interesses econômicos para viabilizar a recuperação de materiais recicláveis em escala nacional (Balieiro, 2022).

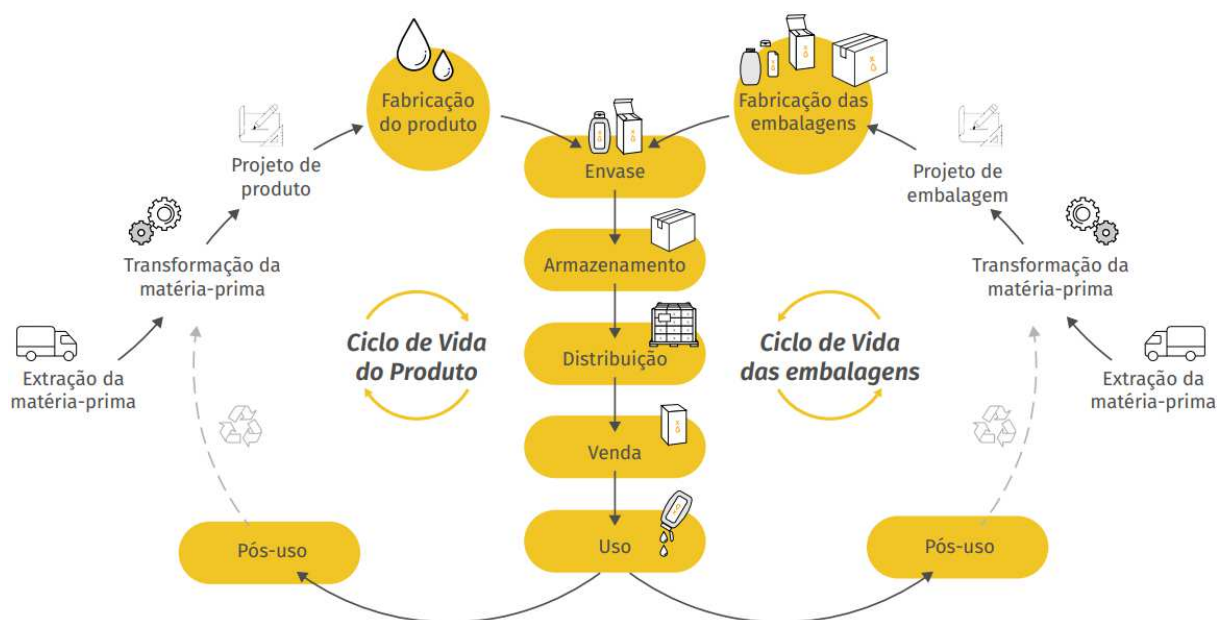
A adoção de sistemas de logística reversa contribui de forma significativa para a mitigação de impactos ambientais, sociais e econômicos associados à geração de resíduos sólidos, em 2024 de acordo com a ABREMA (2025) mais de 1Mt embalagens foram recuperadas, e 17% dessas eram compostas por plásticos. Ao promover o reaproveitamento de embalagens pós-consumo, esses sistemas reduzem o desperdício de matérias-primas e minimizam a disposição inadequada de resíduos em ambientes naturais.

Além disso, o fortalecimento de marcos regulatórios e o aumento da conscientização dos consumidores têm ampliado a responsabilização das empresas quanto ao destino de seus produtos, incentivando práticas que reforçam uma imagem corporativa alinhada aos princípios da sustentabilidade (Silva *et al.*, 2021).

Segundo Balieiro (2022), os acordos voltados à gestão de embalagens pós-consumo priorizam, de maneira geral, materiais classificados como resíduos não perigosos, abrangendo principalmente papel, plástico, metal e vidro. Nesse contexto, foram estabelecidas metas quantitativas de redução da disposição de resíduos em aterros sanitários, associadas ao aumento das taxas de recuperação da fração seca dos resíduos sólidos urbanos. Tais diretrizes reforçam a importância da eficiência dos sistemas de coleta, triagem e reciclagem, além de impactarem diretamente a escolha

e o desenvolvimento de materiais poliméricos com maior potencial de reaproveitamento. A Figura 2 demonstra a relação entre os ciclos de vida de uma embalagem e do seu produto, compartilhando fases que vão desde o envase até o uso.

Figura 2 – Relação entre o ciclo de vida do produto e da embalagem



Fonte: Zeni (2024).

Paralelamente às exigências legais, observa-se que parte do setor industrial já incorporava práticas de logística reversa de forma voluntária, motivada por estratégias de responsabilidade socioambiental e por fatores relacionados à competitividade e à imagem corporativa. Essas iniciativas, quando articuladas com políticas públicas, contribuem para a consolidação de modelos produtivos mais sustentáveis e alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos em âmbito internacional. Dessa forma, a gestão adequada das embalagens e de seus materiais constituintes passa a desempenhar um papel relevante não apenas do ponto de vista ambiental, mas também econômico e social (Balieiro, 2022).

2.2 ALTERNATIVAS AO PLÁSTICO CONVENCIONAL

O Brasil figura entre os principais geradores de resíduos plásticos em escala

global, cenário que intensifica as discussões acerca dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais. Estima-se que o país gere aproximadamente 10,3 milhões de toneladas de resíduos plásticos por ano, dos quais cerca de 3,44 milhões de toneladas são considerados inadequadamente gerenciados, representando um potencial significativo de poluição ambiental (ABRELPE, 2022).

Paralelamente, observa-se a expansão do mercado de produtos orgânicos no varejo, o que exige o uso de embalagens capazes de garantir a proteção, conservação e segurança dos produtos comercializados. No entanto, esse aumento na demanda por embalagens contribui para a elevação do volume de resíduos plásticos gerados, estabelecendo uma contradição entre os princípios da produção orgânica e as práticas atuais de acondicionamento, o que reforça a necessidade de desenvolvimento e adoção de materiais mais sustentáveis (Valle; Guarnieri e Filippi, 2022).

A reutilização consiste na utilização repetida de embalagens plásticas sem a necessidade de submetê-las a novos processos de transformação, os quais, em geral, demandam consumo adicional de energia e recursos. Essa prática apresenta elevado potencial para a redução da geração de resíduos plásticos, uma vez que prolonga a vida útil das embalagens e recipientes. Entretanto, diversos estudos apontam limitações quanto à sua adoção em larga escala, destacando que uma parcela reduzida da população demonstra disposição para reutilizar embalagens plásticas, seja por questões de conveniência, higiene ou hábitos de consumo, o que compromete a efetividade dessa alternativa como solução isolada para o problema dos resíduos plásticos (Rangel et al., 2023).

Os materiais plásticos figuram entre os principais resíduos descartados de forma inadequada no meio ambiente, o que evidencia a urgência na adoção de alternativas sustentáveis e tecnicamente viáveis para sua substituição ou redução de uso. No contexto brasileiro, a elevada geração de resíduos plásticos reflete, em grande parte, os padrões de consumo da sociedade, que influenciam diretamente o volume de materiais descartados após o uso, estima-se que aproximadamente 16 a 17% da massa total de resíduos sólidos urbanos gerados no país seja composta por materiais plásticos (ABRELPE, 2022). Essa realidade reforça a necessidade de estratégias que promovam mudanças no comportamento do consumidor e incentivem soluções mais responsáveis ao longo do ciclo de vida dos produtos (Valle; Guarnieri e Filippi, 2022).

A reciclagem de materiais plásticos pode ser classificada em quatro categorias principais, de acordo com o nível de transformação e a qualidade do material obtido ao final do processo. A primeira corresponde ao reprocessamento mecânico em produtos com propriedades equivalentes às do material original, permitindo sua reinserção em aplicações semelhantes. A segunda refere-se ao reprocessamento mecânico destinado à obtenção de bens com desempenho inferior, geralmente aplicados em usos menos exigentes. A terceira categoria envolve a recuperação de ingredientes químicos, na qual os polímeros são decompostos em frações químicas passíveis de reaproveitamento industrial. Por fim, a quarta classificação compreende a recuperação de constituintes químicos básicos, possibilitando a obtenção de matérias-primas que podem ser utilizadas na síntese de novos materiais poliméricos (Rangel *et al.*, 2023).

A indústria de embalagens destaca-se como um dos maiores setores consumidores de plástico virgem, transformando uma parcela significativa da produção global em produtos de curta vida útil. Muitas dessas embalagens são projetadas para uso único, o que contribui para o aumento expressivo da geração de resíduos sólidos após um curto período de utilização. Embora esse padrão de consumo seja mais recorrente em países de renda média e alta, seus impactos ambientais são globais, reforçando a importância do desenvolvimento de materiais alternativos e de sistemas mais eficientes de reutilização e reciclagem (Valle; Guarnieri e Filippi, 2022).

2.2.1 Bioplásticos

Os bioplásticos são definidos como materiais plásticos de base biológica (bioproduto), biodegradáveis ou que reúnem simultaneamente essas duas características. Assim como os plásticos convencionais, esses materiais podem ser moldados pela ação do calor e da pressão, o que permite sua aplicação em processos industriais tradicionais, como extrusão, injeção e sopro. O desenvolvimento dos bioplásticos surge como uma alternativa ao uso de polímeros de origem fóssil, especialmente em contextos que demandam soluções mais sustentáveis, sem comprometer a funcionalidade e o desempenho das embalagens (Dias, 2023).

De modo geral, os bioprodutos enfrentam dificuldades de inserção no mercado que vão além dos aspectos tecnológicos. Entre os principais entraves destacam-se limitações relacionadas à disponibilidade e ao custo da matéria-prima, desafios financeiros, barreiras de aceitação e percepção por parte do consumidor, além da necessidade de maior apoio por meio de políticas públicas e incentivos governamentais. Adicionalmente, apenas alguns grupos de biopolímeros conseguem competir de forma mais direta com os polímeros convencionais, sobretudo em função do fator preço, que ainda representa um dos principais obstáculos à adoção em larga escala desses materiais (Barbato; Pamplona, 2022).

Os bioplásticos podem ser compreendidos, de forma geral, como uma categoria de polímeros cuja origem está associada a compostos derivados de biomassa. No entanto, visando evitar ambiguidades e interpretações equivocadas, a *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) recomenda a não utilização do termo bioplástico, sugerindo sua substituição por expressões como polímeros de base biológica ou plásticos bioderivados. Sob essa perspectiva, esses materiais representam uma rota alternativa para a produção de plásticos, ao reduzir a dependência de recursos não renováveis e contribuir para a continuidade da oferta de materiais poliméricos essenciais à sociedade no longo prazo (Fontana, 2025).

A difusão dos bioplásticos no Brasil é influenciada por um conjunto de fatores estruturais, econômicos, institucionais e sociais, que podem atuar tanto como barreiras quanto como elementos indutores de sua adoção em larga escala. A compreensão dessas hipóteses permite analisar de forma mais consistente os desafios e as oportunidades associados à expansão do uso de bioplásticos no mercado nacional (Barbato; Pamplona, 2022):

- Monopólio da produção - a concentração da produção limita a oferta do insumo básico e restringe a difusão dos bioplásticos;
- Baixo valor agregado dos produtos - a aplicação de bioplásticos em produtos de menor valor reduz o incentivo econômico para sua adoção;
- Readequação do parque industrial - a necessidade de ajustes em equipamentos e processos produtivos representa um obstáculo relevante;
- Atuação de agentes públicos - políticas regulatórias e incentivos governamentais podem impulsionar a difusão dos bioplásticos;

- Cooperação empresarial - maior integração e colaboração entre os agentes da cadeia produtiva favorecem a expansão do setor;
- Infraestrutura de reciclagem e biodegradação - a existência de políticas e estruturas adequadas estimula a difusão dos bioplásticos;
- Apoio da população - a aceitação e o engajamento da sociedade em geral funcionam como fator de estímulo à sua adoção.

Os plásticos convencionais são polímeros obtidos a partir da polimerização de monômeros derivados de recursos fósseis, sendo que a natureza desses monômeros e a forma como se ligam entre si exercem papel determinante nas propriedades físico-químicas das macromoléculas formadas. Essa combinação estrutural é responsável pela ampla diversidade, versatilidade e aplicabilidade dos materiais plásticos, permitindo seu uso em inúmeros setores industriais. Em função disso, os bioplásticos, enquanto alternativa aos polímeros de origem fóssil, precisam apresentar variedade e desempenho técnico compatíveis com suas contrapartes convencionais, de modo a atender às mesmas exigências funcionais (Fontana, 2025).

O termo bioplástico apresenta uma definição ampla e, por vezes, é interpretado de forma equivocada. Essa denominação engloba tanto plásticos duráveis e não biodegradáveis produzidos a partir de fontes renováveis quanto plásticos biodegradáveis que podem ter origem fóssil. Dessa forma, a classificação dos bioplásticos depende mais de suas propriedades de biodegradabilidade e da fonte da matéria-prima do que de um único critério isolado. Assim, existem bioplásticos adequados à compostagem e bioplásticos de origem vegetal resistentes à degradação, sendo a escolha do material fortemente condicionada à aplicação final e às exigências de desempenho do produto (Dias, 2023).

Nesse contexto, grande parte das pesquisas atuais sobre bioplásticos concentra-se no desenvolvimento de materiais capazes de desempenhar esse papel de substituição, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para o avanço da sustentabilidade. Como podem ser obtidos por diferentes rotas de produção, os biopolímeros são geralmente classificados em três grandes grupos, de acordo com sua origem: aqueles derivados de recursos agrícolas, biomassa ou fontes renováveis; os produzidos por microrganismos ou de origem animal; e os sintetizados quimicamente a partir de polímeros naturais ou de derivados do petróleo, com características de biodegradabilidade (Fontana, 2025).

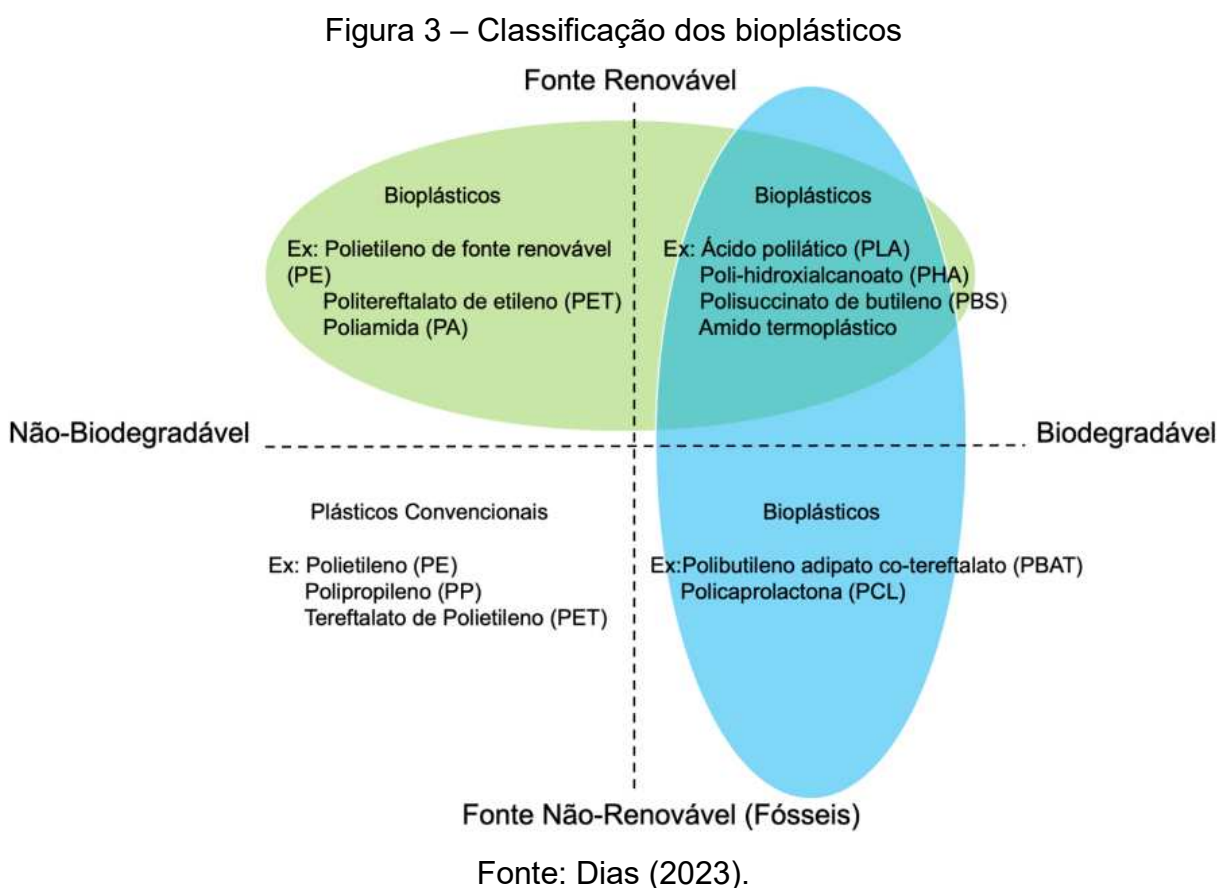
No contexto dos biopolímeros, torna-se essencial discutir a distinção entre materiais classificados como *drop-in* e *não drop-in*, uma vez que essa categorização impacta diretamente a cadeia produtiva e o comércio de produtos químicos de origem renovável. Os bioplásticos *drop-in* são aqueles que apresentam características e propriedades equivalentes às de seus correspondentes petroquímicos, permitindo sua utilização na infraestrutura industrial existente, sem a necessidade de investimentos significativos em novos equipamentos ou processos. Um exemplo representativo é o polietileno de origem renovável, conhecido como PE Verde, produzido no Brasil, que mantém as propriedades técnicas, aparência e aplicações do polietileno fóssil. Essa similaridade reduz riscos operacionais e econômicos para as empresas do setor, tornando a adoção de moléculas *drop-in* uma alternativa mais segura dentro do processo de transição para materiais de base renovável (Barbato; Pamplona, 2022). O Quadro 1 define os principais tipos de plásticos desenvolvidos.

Quadro 1 – Tipos de bioplásticos e suas definições

Tipo de bioplástico	Definição	Características
Ácido polilático (PLA)	Bioplástico obtido a partir do ácido láctico proveniente da fermentação de carboidratos, sendo derivado de fontes renováveis.	Apresenta boa processabilidade térmica e propriedades de barreira moderadas, sendo amplamente utilizado em embalagens, embora possua baixa tenacidade e biodegradação restrita a condições industriais.
Poli-hidroxialcanoatos (PHAs)	Classe de bioplásticos sintetizados por microrganismos a partir da fermentação de açúcares ou lipídios.	Destacam-se por serem biodegradáveis em condições ambientais e marinhas, além de apresentarem biocompatibilidade e baixa toxicidade.
Furanoato de polietileno (PEF)	Bioplástico de base biológica estruturalmente semelhante ao PET, no qual o anel aromático é substituído por um anel furânico.	Possui propriedades de barreira superiores a gases e elevado potencial para aplicações em embalagens, apesar do alto custo de produção atual.
Succinato de polibutileno (PBS)	Poliéster semicristalino que pode ser obtido parcial ou totalmente a partir de fontes renováveis.	Apresenta flexibilidade e propriedades similares ao polietileno de baixa densidade, sendo biodegradável em condições específicas e aplicado em filmes e embalagens.
Bioplásticos <i>drop-in</i>	Polímeros quimicamente idênticos aos plásticos convencionais, porém produzidos a partir de matérias-primas renováveis.	Mantêm as mesmas propriedades e aplicações dos polímeros fósseis, como o bio-PE e o bio-PET, contribuindo principalmente pela substituição da fonte de carbono.

Fonte: Quadro autoral (2026). Adaptado de Fontana (2025).

No ciclo de vida dos plásticos derivados do petróleo, após as etapas de produção e uso, os resíduos gerados podem ter diferentes destinações, como a reciclagem, que se destaca por permitir o reaproveitamento do material como matéria-prima, além da disposição incorretas em aterros sanitários ou da incineração, devido à falta de coleta seletiva. Contudo, quando a gestão desses resíduos é ineficiente, seja por ausência de destinação adequada ou por falhas no projeto e na operação de aterros, os plásticos acabam sendo liberados no meio ambiente. Nessas condições, ficam sujeitos a processos de degradação que, a depender de sua biodegradabilidade, podem resultar na formação de compostos assimiláveis pelo ecossistema ou na geração de microplásticos, os quais tendem a se acumular no ambiente e causar impactos ambientais persistentes (Fontana, 2025). A Figura 3 ilustra a classificação dos bioplásticos quando a sua renovabilidade e biodegradabilidade.



Diante do exposto, observa-se que os bioplásticos representam uma alternativa relevante no contexto da transição para materiais mais sustentáveis, sobretudo por

estarem associados, em maior ou menor grau, à utilização de fontes renováveis e a diferentes potenciais de biodegradabilidade. No entanto, esses dois aspectos não são necessariamente concomitantes, uma vez que a origem renovável do polímero não garante sua biodegradação em condições ambientais, assim como a biodegradabilidade pode estar presente em materiais de base fóssil (Fontana, 2025).

2.2.2 Polímeros reciclados

A reciclagem de plásticos pode ser realizada por diferentes vias tecnológicas, destacando-se a reciclagem mecânica, térmica e química, as quais são aplicadas conforme o tipo de material e o grau de contaminação dos resíduos. Cada uma dessas abordagens apresenta características próprias e contribui de forma distinta para o gerenciamento dos resíduos plásticos, possibilitando sua transformação em compósitos ou matérias-primas de maior valor agregado. Dessa forma, tais processos desempenham papel relevante na mitigação dos impactos ambientais associados ao amplo uso do plástico, ao mesmo tempo em que favorecem a economia circular e a redução da demanda por recursos naturais virgens (Rangel *et al.*, 2023).

As embalagens fabricadas em PET representam uma alternativa relevante no contexto do desenvolvimento sustentável, principalmente devido à sua elevada capacidade de reinserção na cadeia produtiva de diferentes setores industriais. No entanto, a efetividade desse potencial está diretamente associada ao comportamento do consumidor no período pós-consumo, uma vez que a decisão quanto ao descarte adequado da embalagem determina sua inclusão nos sistemas de coleta seletiva. Quando corretamente direcionado, o resíduo de PET pode ser reciclado, reduzindo a quantidade de materiais destinados a aterros ou ao meio ambiente e contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais associados ao uso de plásticos (Valle; Guarnieri e Filippi, 2022).

Segundo Rangel *et al.* (2023), avanços recentes nas tecnologias de reciclagem química têm demonstrado elevado potencial para o reaproveitamento de plásticos pós-consumo, especialmente polietileno e polipropileno. A despolimerização química destaca-se como uma alternativa capaz de converter esses materiais em seus monômeros originais ou em moléculas de alto valor agregado, possibilitando a produção de novos polímeros com desempenho equivalente ou superior ao material virgem. Essa abordagem apresenta viabilidade industrial e caráter sustentável,

superando limitações associadas à reciclagem mecânica. No entanto, devido à elevada estabilidade estrutural dos polímeros, a eficiência do processo geralmente exige condições operacionais mais severas, como altas temperaturas, uso de catalisadores ou técnicas avançadas de ativação energética.

Camargo (2023) trata sobre os plásticos de engenharia que constituem um grupo de polímeros sintéticos de alto desempenho, caracterizados por propriedades mecânicas, térmicas e químicas superiores às dos plásticos convencionais. Em razão dessas características, esses materiais podem ser aplicados em condições mais severas, nas quais estão sujeitos a impactos, vibrações, tensões mecânicas elevadas, altas temperaturas ou ambientes agressivos que promoveriam a degradação acelerada de polímeros comuns. Assim, são amplamente utilizados na fabricação de peças mecânicas, componentes estruturais e elementos de alta precisão. Esses polímeros adquiriram especial relevância nas indústrias eletrônica e automobilística, principalmente como alternativa à substituição de metais, em virtude de sua elevada resistência à corrosão, menor massa específica e relação custo-benefício favorável. O Quadro 2 aponta quase são esses plásticos e suas características principais.

Quadro 2 – Os plásticos da engenharia

Polímero	Descrição	
Poliestireno (PS)	Polímero produzido nas formas poliestireno de uso geral (<i>general purpose – GP</i>), poliestireno expandido (<i>expanded polystyrene – EPS</i>) e poliestireno de alto impacto (<i>high impact – HI</i>).	O PS GP destaca-se pela transparência e facilidade de coloração, o EPS pela leveza e isolamento térmico, e o PS HI pela maior resistência ao impacto, sendo utilizados em embalagens e aplicações industriais.
Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	Polímero amorfo de baixa densidade e boas propriedades mecânicas.	Amplamente utilizado em carcaças de equipamentos eletrônicos e aplicações industriais, podendo substituir o poliestireno de alto impacto ou ser empregado em blendas com policarbonato.
Poliâmidas (PA)	Polímeros de elevada resistência térmica e mecânica.	Utilizados em aplicações estruturais, mecânicas e na forma de fibras, exigindo maior controle durante o processamento.
Poliaramidas	Polímeros de alto desempenho, caracterizados por elevada resistência térmica e mecânica.	Aplicados principalmente na forma de fibras em equipamentos de proteção, isolamentos elétricos e compósitos avançados.

Poliacetais (POM)	Polímeros cristalinos também conhecidos como polioximetilenos, com boa resistência mecânica e estabilidade dimensional.	Empregados como substitutos de metais em engrenagens, bombas e componentes industriais, apresentando limitações em aplicações de alta temperatura.
Policarbonatos (PC)	Polímeros amorfos de elevada resistência ao impacto, transparência e estabilidade térmica, formados a partir de bisfenóis.	amplamente utilizados em aplicações automotivas, elétricas e em embalagens, tanto na forma pura quanto em blends.

Fonte: Camargo (2023).

Diversos grupos de polímeros vêm sendo estudados quanto à sua aplicabilidade em processos de reciclagem química, incluindo poliésteres, poliamidas, poliolefinas, poliuretanos, poliestireno, policarbonatos e acrílicos. Paralelamente, a reciclagem física de plásticos de menor valor agregado, frequentemente denominada reciclagem *downgrade*, consiste na transformação de resíduos por meio de processos como separação, lavagem, trituração e fusão, preservando a estrutura química do material. Embora resulte em produtos com propriedades mecânicas inferiores, essa abordagem contribui para a redução do volume de resíduos descartados e amplia o ciclo de vida dos plásticos (Rangel *et al.*, 2023).

Segundo Valle, Guarnieri e Filippi (2022), o politereftalato de etileno (PET) destaca-se entre os materiais poliméricos com maior índice de reciclagem, resultado da combinação entre a ampla adoção de sistemas de coleta seletiva e as propriedades da própria resina, que apresenta elevada reciclabilidade. Classificado como plástico do tipo 1, o PET pode ser integralmente reprocessado, o que favorece sua reinserção em diferentes cadeias produtivas. O PET reciclado possui aplicações diversificadas em segmentos como o têxtil, a fabricação de utensílios, componentes de engenharia e novas embalagens, além de ser utilizado na forma de pellets para diferentes finalidades industriais. Ademais, a reciclagem desse material contribui para a redução do consumo de petróleo, recurso energético não renovável amplamente empregado na produção de plásticos virgens.

Como ocorre em qualquer processo produtivo, a fabricação de produtos à base de plástico mantém uma interação direta com o meio ambiente ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas, passando pela geração de resíduos e consumo de energia durante o processamento, até a etapa final de descarte após o uso. No Brasil, a gestão adequada desses resíduos é orientada pela

Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que estabelece princípios, objetivos e instrumentos para a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos, incluindo a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (Brasil, 2010).

Em modelos de manufatura artesanal e de baixa escala, caracterizados por fluxos lineares de produção, nos quais a matéria-prima é transformada em produto e posteriormente descartada, esses impactos tendem a ser menos significativos. Contudo, diante da elevada velocidade e dos grandes volumes de produção da sociedade contemporânea, o modelo linear mostra-se insustentável, uma vez que resulta no aumento expressivo da geração de resíduos sólidos, frequentemente associados a produtos com vida útil cada vez mais curta (Camargo, 2023).

Dentre elas, a reciclagem mecânica destaca-se por ser a mais simples e a mais amplamente aplicada em escala mundial, consistindo no reaproveitamento dos resíduos por meio de etapas como triagem em espécies químicas compatíveis, lavagem, trituração e extrusão. Ao final do processo, os materiais são novamente transformados em *pellets*, que correspondem à matéria-prima utilizada em processos convencionais de transformação de polímeros, como a extrusão e a injeção, possibilitando sua reinserção na cadeia produtiva (Peres; Barbosa e Szilágyi, 2025).

A etapa de segregação dos resíduos plásticos é fundamental para a eficiência do processo de reciclagem, uma vez que a correta separação dos materiais influencia diretamente a qualidade do produto reciclado e sua viabilidade técnica e econômica. Diferentes métodos de segregação são empregados conforme o nível de capacitação técnica, infraestrutura disponível e tipo de plástico processado. Os tipos de segregação de resíduos plásticos são (Camargo, 2023):

- Segregação por produto - realizada principalmente por empresas de pequeno porte, na qual os resíduos são separados de acordo com o produto de origem, sem identificação precisa do tipo de polímero;
- Segregação por queima - método utilizado por cooperativas, baseado na identificação dos plásticos por meio do odor liberado durante a queima, sendo mais comum para plásticos commodities e pouco eficiente para plásticos de engenharia;
- Segregação por densidade - processo mais especializado, que utiliza a diferença de densidade dos polímeros em meio aquoso para separar

plásticos commodities dos plásticos de engenharia, sendo posteriormente complementado por outras análises;

- Segregação por bancada não especializada - triagem predominantemente visual, baseada em símbolos, características físicas ou produtos de origem, com capacidade limitada de separação e menor precisão para plásticos de engenharia.

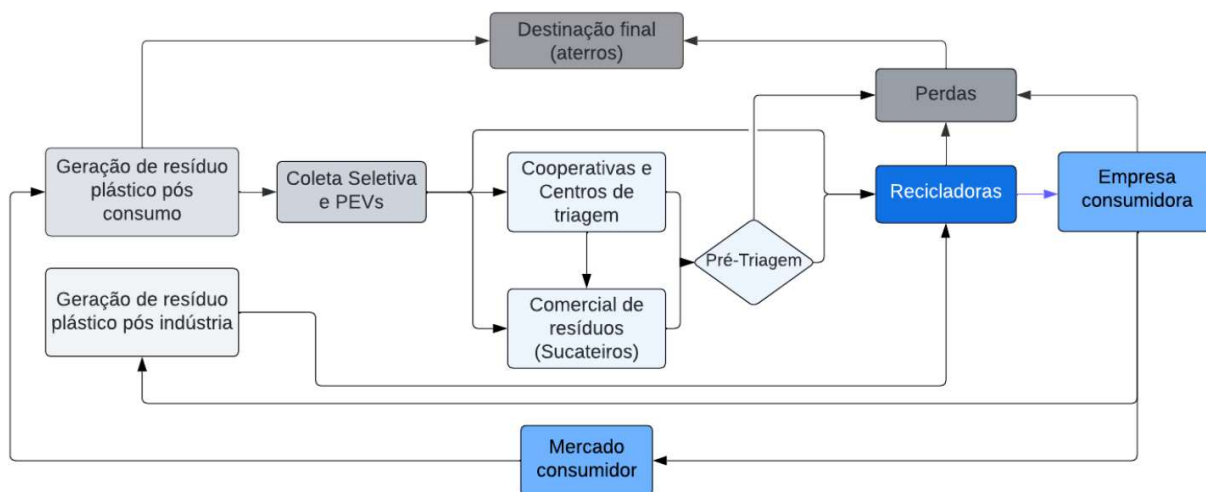
A produção de materiais compósitos a partir de resíduos plásticos representa outra estratégia relevante para a valorização desses materiais. Compósitos são obtidos pela combinação de diferentes materiais com propriedades complementares, visando melhorar o desempenho final do produto. A incorporação de resíduos plásticos a fibras têxteis ou outros resíduos industriais têm possibilitado o desenvolvimento de painéis e componentes com boas propriedades térmicas e acústicas, além de resistência mecânica adequada para aplicações comerciais e estruturais. Esses materiais apresentam potencial para substituição parcial de matérias-primas convencionais, contribuindo para a sustentabilidade dos processos produtivos (Rangel *et al.*, 2023).

Entre as diferentes alternativas para o reaproveitamento de resíduos plásticos pós-consumo, tanto de origem doméstica quanto industrial, a reciclagem mecânica destaca-se por ser o método que menos altera a composição química do material. Embora não seja capaz de preservar integralmente as propriedades que conferem elevado valor aos plásticos de engenharia, essa abordagem apresenta a vantagem de manter a estrutura polimérica original, possibilitando sua reinserção em novas aplicações. Além disso, trata-se de um processo relativamente mais econômico quando comparado a outras rotas, como a reciclagem química, que frequentemente converte os polímeros em combustíveis ou insumos químicos, dificultando a reintrodução direta desses materiais na cadeia produtiva de plásticos (Camargo, 2023).

A reciclagem mecânica é a rota mais utilizada no Brasil para o reaproveitamento de resíduos plásticos. De acordo com dados da Associação Brasileira do Plástico, o índice de reciclagem mecânica de plásticos pós-consumo no país alcançou 25,6% em 2022, correspondendo a aproximadamente 1,7 milhão de toneladas recicladas. Quando analisado especificamente o segmento de embalagens plásticas, o índice de reciclagem mecânica brasileiro atinge 28,7%, posicionando o país à frente de nações como Estados Unidos, Argentina e Chile. Apesar desse protagonismo, alternativas

com custos mais elevados e maior demanda energética também vêm sendo aplicadas, como a reciclagem química, que, embora apresente desafios ambientais e tecnológicos, desempenha papel fundamental no avanço da economia circular e na ampliação das possibilidades de reaproveitamento dos materiais poliméricos (Peres; Barbosa e Szilágyi, 2025). Na Figura 4 é apresentado o fluxograma dos resíduos sólidos na cadeia de reciclagem.

Figura 4 – Fluxograma do caminho dos resíduos sólidos na reciclagem



Fonte: Camargo (2023).

Tecnologias inovadoras também têm explorado a conversão de resíduos plásticos em aerogéis de alto valor agregado. Por meio de processos físico-químicos específicos, como trituração, lavagem, fusão, pirólise, solvólise, entre outros, é possível obter materiais ultraleves, porosos e hidrofóbicos, com elevada eficiência em aplicações como separação de água e óleo, isolamento térmico e resistência a ambientes agressivos. Aerogéis produzidos a partir de plásticos reciclados apresentam, ainda, maior resistência ao fogo e à compressão em comparação aos polímeros convencionais, ampliando significativamente seu campo de aplicação em setores industriais e ambientais (Rangel *et al.*, 2023).

Outro aspecto relevante da reciclagem mecânica é sua versatilidade operacional, uma vez que permite o processamento de diferentes tipos de polímeros com poucas alterações no fluxo produtivo, característica especialmente favorável diante da diversidade de plásticos de engenharia existentes. Sob a perspectiva energética, o processo também se mostra eficiente, pois demanda menor consumo

de energia em comparação à produção de polímeros virgens. Ainda assim, o custo energético permanece um fator crítico para a viabilidade econômica da reciclagem, considerando que grande parte das despesas operacionais está associada à energia elétrica utilizada durante as etapas de processamento (Camargo, 2023).

A reciclagem é dividida em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária (Peres; Barbosa e Szilágyi, 2025). O Quadro 3 apresenta o processo principal de cada uma, bem como suas principais características.

Quadro 3 – Categorias das reciclagens de polímeros

Tipo de reciclagem	Processo	Descrição	
Reciclagem Primária	Mecânico	Consiste na conversão de resíduos poliméricos oriundos de processos industriais por meio de métodos de processamento mecânico, resultando em produtos.	Características equivalentes às daqueles fabricados com polímeros virgens.
Reciclagem Secundária	Mecânico	Processo semelhante à reciclagem primária, aplicado a resíduos plásticos pós-consumo, como aqueles provenientes de resíduos sólidos urbanos.	Materiais com propriedades inferiores às do polímero original.
Reciclagem Terciária	Químico	Envolve a quebra das cadeias poliméricas por processos químicos	Petroquímicos primários ou insumos que podem ser reutilizados na produção de novos materiais.
Reciclagem Quaternária	Energético	Processo de aproveitamento energético dos resíduos poliméricos por meio de sua combustão completa.	Recuperação de energia na forma de calor ou eletricidade.

Fonte: Quadro autoral (2026). Adaptado de Peres, Barbosa e Szilágyi (2025).

Tanto a reciclagem primária quanto a reciclagem secundária são enquadradas como reciclagem mecânica, uma vez que envolvem etapas semelhantes de separação, classificação, lavagem, trituração, fusão e remoldagem dos materiais plásticos. A principal diferença entre essas duas abordagens reside na natureza dos resíduos processados, sendo que a reciclagem mecânica primária utiliza exclusivamente plásticos não contaminados, como resíduos pós-industriais ou resíduos pós-consumo de origem conhecida. Essa característica possibilita a obtenção de produtos com qualidades e propriedades muito próximas às do plástico original, favorecendo sua reutilização em aplicações de maior valor agregado (Farias; Scur, 2024).

Uma das formas de promover a separação manual dos resíduos plásticos consiste na utilização da simbologia estabelecida pela norma NBR 13.230, que define um padrão de identificação para os diferentes tipos de resinas poliméricas. Essa padronização facilita o reconhecimento visual dos materiais ao longo das etapas de triagem, contribuindo para a correta segregação e para a melhoria da eficiência dos processos de reciclagem (ABNT, 2008). Os símbolos associados a cada tipo de polímero permitem a identificação rápida do material, conforme ilustrado na Figura 5, reduzindo erros de classificação e favorecendo a qualidade do material reciclado.

Figura 5 – Simbologia de polímeros



Fonte: Peres, Barbosa e Szilágyi (2025).

No setor da construção civil, a reutilização de plásticos reciclados tem se mostrado uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente favorável. A incorporação desses resíduos em concretos, tijolos, pavimentos e misturas asfálticas tem resultado em melhorias de desempenho mecânico, redução de ruído e aumento da durabilidade dos materiais. Além disso, resíduos plásticos podem ser convertidos em combustíveis por meio de processos térmicos, como a pirólise, gerando fontes energéticas alternativas. Essas aplicações evidenciam o potencial dos plásticos reciclados como materiais versáteis, capazes de contribuir para a economia circular e para a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado (Rangel *et al.*, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados no desenvolvimento da pesquisa, descrevendo o tipo de abordagem utilizada, as fontes de dados consultadas e os critérios empregados para a análise comparativa dos materiais poliméricos aplicados em embalagens cosméticas.

3.1 TIPO E ABORDAGEM DA PESQUISA

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, com delineamento bibliográfico e comparativo. Essa abordagem foi adotada em função do objetivo do trabalho, que consiste em analisar e comparar diferentes polímeros utilizados em embalagens cosméticas, com ênfase nos bioplásticos e nos polímeros reciclados, a partir de informações técnicas e científicas disponíveis na literatura. O método comparativo permitiu avaliar diferenças e semelhanças entre os materiais quanto ao desempenho e à aplicabilidade no setor cosmético.

3.2 PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica, utilizando bases de dados científicas reconhecidas, como Google Acadêmico, SciELO, ScienceDirect, SpringerLink e o Portal de Periódicos CAPES, além de livros técnicos, normas e publicações institucionais relacionadas à engenharia de materiais e à sustentabilidade. A busca foi orientada por palavras-chave relacionadas ao tema, tais como embalagens cosméticas, bioplásticos, polímeros reciclados, propriedades de barreira e durabilidade de materiais.

Foram considerados, prioritariamente, trabalhos publicados entre 2015 e 2025, com ênfase em artigos revisados por pares e documentos técnicos com respaldo metodológico. Fontes sem caráter científico ou técnico, como materiais exclusivamente publicitários, foram excluídas da análise.

3.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

A fundamentação teórica foi construída a partir da análise crítica da literatura selecionada e estruturada de modo a atender aos objetivos específicos da pesquisa. Inicialmente, abordou-se o papel e a importância das embalagens na indústria cosmética, seguido da caracterização dos bioplásticos e dos polímeros reciclados utilizados nesse setor. As informações levantadas foram organizadas de forma sistemática, com apoio de quadros e tabelas comparativas, quando pertinente, visando facilitar a compreensão dos aspectos técnicos dos materiais estudados.

3.4 ANÁLISE COMPARATIVA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos dados consistiu na comparação técnica dos polímeros convencionais, bioplásticos e polímeros reciclados, com base em informações reportadas na literatura. Foram considerados, principalmente, parâmetros relacionados às propriedades de barreira, como permeabilidade a gases e vapor d'água, e à durabilidade, incluindo resistência mecânica, térmica e estabilidade ao longo do tempo.

Os resultados obtidos foram discutidos de forma crítica, confrontando os achados da pesquisa com a fundamentação teórica, de modo a avaliar a viabilidade e as limitações do uso de materiais mais sustentáveis em embalagens cosméticas, bem como suas implicações para a indústria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

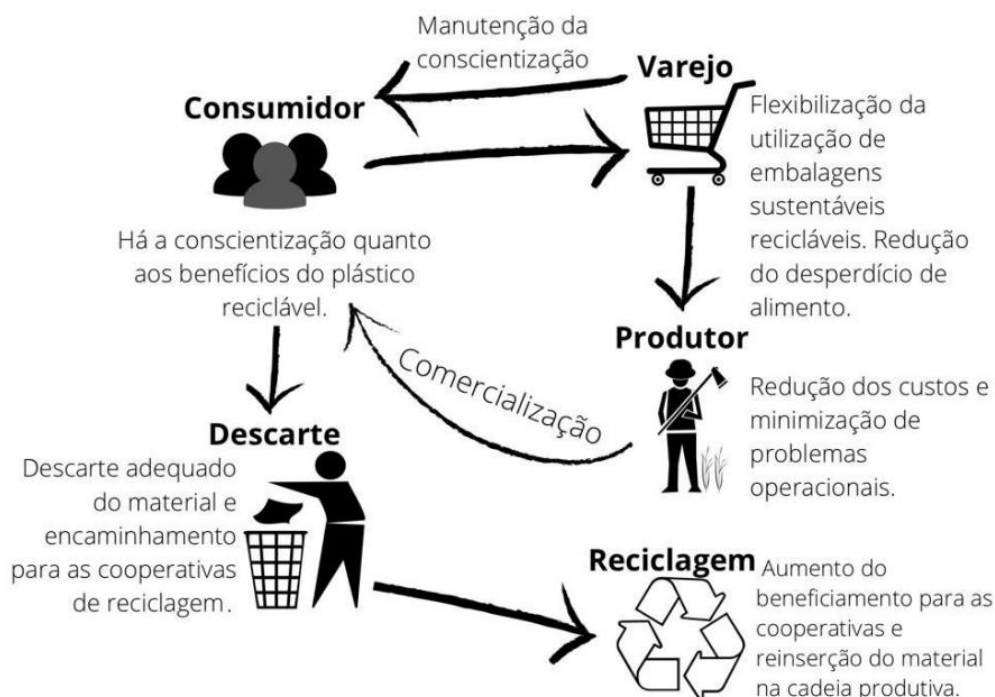
Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir da revisão bibliográfica e da análise comparativa dos materiais poliméricos abordados neste trabalho, com foco nos polímeros reciclados e nos bioplásticos aplicados a embalagens. A discussão é construída exclusivamente com base nos autores e documentos constantes nas referências bibliográficas do estudo, buscando relacionar desempenho técnico, aspectos ambientais, logística reversa e implicações para a economia circular.

4.1 PANORAMA DA PRODUÇÃO, USO E GESTÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

A produção e o consumo de materiais plásticos permanecem fortemente associados a polímeros de origem fóssil, que dominam o mercado em razão do baixo custo, ampla disponibilidade e desempenho técnico consolidado. No entanto, esse modelo linear de produção, uso e descarte tem gerado impactos ambientais significativos, especialmente quando associado a falhas na coleta, na segregação e na destinação final dos resíduos. Nesse contexto, a gestão adequada dos resíduos plásticos torna-se elemento central para a mitigação desses impactos, conforme discutido por Rangel *et al.* (2023), ao analisarem a aplicação dos princípios dos 3Rs: redução, reutilização e reciclagem.

Balieiro (2022) destaca que a logística reversa surge como um dos principais instrumentos para reinserção dos resíduos plásticos na cadeia produtiva, reduzindo a pressão sobre recursos naturais e minimizando a disposição em aterros. Entretanto, a efetividade desses sistemas depende da articulação entre produtores, consumidores e agentes de coleta e reciclagem, conforme ilustrado na Figura 6, que representa a relação entre consumo, descarte e reaproveitamento de materiais.

Figura 6 – Processo de conscientização quanto ao uso do plástico



Fonte: Valle, Guarnieri e Filippi (2022).

4.2 POLÍMEROS RECICLADOS E RECICLAGEM MECÂNICA

A reciclagem mecânica é apontada na literatura como a principal rota de reaproveitamento de resíduos plásticos no Brasil, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Camargo (2023) evidencia que esse processo apresenta maior viabilidade para polímeros amplamente utilizados, como PE, PP e PET, sobretudo quando há segregação adequada e controle de contaminação. Farias e Scur (2024) complementam que, apesar de suas vantagens, a reciclagem mecânica enfrenta barreiras relacionadas à heterogeneidade dos resíduos, à perda gradual de propriedades e à limitação de aplicações de maior valor agregado.

Ainda assim, os polímeros reciclados se mostram estratégicos para a transição à economia circular, especialmente no setor de embalagens. Silva et al. (2021) ressaltam que a incorporação de conteúdo reciclado em embalagens, aliada a estratégias de marketing verde, contribui para a valorização ambiental dos produtos e para o fortalecimento da imagem corporativa. Do ponto de vista energético e ambiental, a reciclagem mecânica apresenta vantagens em relação à produção de polímeros virgens, reforçando seu papel como solução de curto e médio prazo.

4.3 BIOPLÁSTICOS: POTENCIAL, LIMITAÇÕES E DESAFIOS DA DIFUSÃO

Os bioplásticos são apresentados na literatura como uma rota alternativa para a redução da dependência de recursos fósseis, embora não representem uma solução homogênea. Dias (2023) e Fontana (2025) ressaltam que o termo abrange materiais com diferentes origens, propriedades e níveis de biodegradabilidade, o que frequentemente gera interpretações equivocadas sobre seus benefícios ambientais. A renovabilidade da matéria-prima, por si só, não garante menor impacto ambiental, sendo necessário avaliar todo o ciclo de vida do material.

Barbato e Pamplona (2022) destacam que a ampliação do uso de bioplásticos no Brasil ainda enfrenta diversos desafios estruturais que dificultam sua consolidação no mercado. Entre os principais entraves apontados pelos autores estão os custos de produção mais elevados em comparação aos plásticos convencionais derivados do petróleo, a concentração da produção em poucos polos industriais e as limitações tecnológicas relacionadas tanto ao desenvolvimento quanto à escala de fabricação desses materiais. Esses fatores reduzem a competitividade dos bioplásticos e limitam sua difusão na cadeia produtiva. Além disso, os autores ressaltam que os benefícios ambientais associados aos bioplásticos biodegradáveis dependem diretamente da existência de sistemas adequados de gestão de resíduos (Barbato; Pamplona, 2022). Esses fatores explicam, em parte, a baixa participação dos plásticos de base biológica na produção global, conforme evidenciado na Figura 7.

Figura 7 - Produção mundial de plásticos em 2021



Fonte: Dias (2023).

4.4 ANÁLISE COMPARATIVA E IMPLICAÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE

A análise conjunta dos estudos indica que os polímeros reciclados e os bioplásticos desempenham papéis distintos, porém complementares, na busca por maior sustentabilidade no setor de embalagens. Enquanto os materiais reciclados apresentam maior maturidade tecnológica e imediata aplicabilidade, os bioplásticos representam uma alternativa de médio e longo prazo, condicionada ao avanço tecnológico, à redução de custos e à ampliação da infraestrutura de gestão de resíduos.

Valle, Guarnieri e Filippi (2023) destacam que a adoção de embalagens sustentáveis deve ser analisada sob a ótica da economia circular, considerando não apenas o material utilizado, mas também os fluxos de produção, consumo e pós-consumo. Nesse sentido, iniciativas de design sustentável (Zeni, 2024), programas de extensão e educação ambiental (Peres et al., 2025) e o alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável propostos pela ONU (2026) são fundamentais para potencializar os benefícios ambientais dessas alternativas.

Assim, os resultados deste trabalho indicam que a substituição dos plásticos convencionais não pode ser resolvida por uma única alternativa tecnológica ou material, exigindo uma abordagem mais ampla e integrada. Nesse contexto, torna-se fundamental combinar diferentes estratégias complementares, como o aprimoramento dos sistemas de reciclagem mecânica, o uso estratégico de bioplásticos em aplicações específicas onde apresentem vantagens ambientais e técnicas, e o fortalecimento de políticas públicas voltadas à gestão de resíduos. Além disso, a ampliação e a efetividade dos sistemas de logística reversa são essenciais para garantir o retorno adequado dos materiais ao ciclo produtivo, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para a consolidação de um modelo mais sustentável de produção e consumo de plásticos.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo analisar comparativamente o desempenho de bioplásticos e polímeros reciclados aplicados em embalagens cosméticas, considerando especialmente suas propriedades de barreira e durabilidade. A partir da revisão bibliográfica realizada, foi possível compreender que a escolha do material de embalagem envolve uma complexa interação entre requisitos técnicos, exigências mercadológicas e demandas ambientais, exigindo uma abordagem sistêmica e fundamentada em critérios de desempenho e sustentabilidade.

Nesse contexto, verifica-se que os objetivos específicos propostos para o desenvolvimento deste estudo foram alcançados. De forma sintética, destacam-se os seguintes resultados:

- Investigação do papel das embalagens na indústria cosmética - a revisão bibliográfica permitiu compreender que as embalagens desempenham funções que vão além da simples contenção do produto, envolvendo requisitos de proteção contra agentes externos, preservação das propriedades do cosmético, apelo estético e comunicação com o consumidor, além de crescente pressão por soluções ambientalmente responsáveis;
- Caracterização dos bioplásticos e polímeros reciclados - foram identificadas e descritas as principais características físico-químicas desses materiais, incluindo suas propriedades mecânicas, de barreira e suas limitações tecnológicas. Observou-se que bioplásticos apresentam vantagens relacionadas ao uso de matérias-primas renováveis, enquanto os polímeros reciclados se destacam pela reinserção de materiais no ciclo produtivo;
- Análise comparativa das propriedades de barreira e durabilidade - a comparação evidenciou que ambas as alternativas possuem potencial técnico para aplicação em embalagens cosméticas, porém apresentam diferenças relevantes quanto ao desempenho, custo, disponibilidade e infraestrutura necessária para sua adequada gestão ao final do ciclo de vida.

Os resultados evidenciam que tanto os bioplásticos quanto os polímeros reciclados apresentam potencial significativo como alternativas ao plástico convencional de origem fóssil, porém com características e limitações distintas. Os bioplásticos destacam-se principalmente pela utilização de fontes renováveis e, em alguns casos, pela biodegradabilidade, contribuindo para a redução da dependência de recursos não renováveis. No entanto, desafios relacionados ao custo, à infraestrutura de compostagem, à escala produtiva e às propriedades mecânicas e de barreira ainda limitam sua ampla difusão no setor cosmético.

Por outro lado, os polímeros reciclados demonstram elevada relevância no contexto da economia circular, especialmente quando associados a sistemas eficientes de coleta seletiva e reciclagem mecânica ou química. Materiais como o PET reciclado apresentam boa viabilidade técnica para reinserção na cadeia produtiva, com desempenho compatível a diversas aplicações em embalagens. Contudo, a manutenção das propriedades físico-químicas ao longo dos ciclos de reciclagem e a dependência do comportamento adequado do consumidor quanto ao descarte continuam sendo fatores críticos para sua efetividade.

A análise comparativa permitiu concluir que não há uma solução única e universalmente superior, mas sim alternativas que devem ser avaliadas conforme a aplicação específica, os requisitos de barreira ao oxigênio e à umidade, a resistência mecânica exigida, o ciclo de vida pretendido e a infraestrutura disponível para gestão de resíduos. Dessa forma, a decisão pela adoção de bioplásticos ou polímeros reciclados deve considerar não apenas o apelo ambiental, mas também critérios técnicos, econômicos e logísticos.

Conclui-se, portanto, que a transição para embalagens mais sustentáveis no setor cosmético depende da integração entre inovação tecnológica, políticas públicas eficazes, conscientização do consumidor e estratégias empresariais alinhadas aos princípios da economia circular. A Engenharia Química desempenha papel fundamental nesse processo, ao contribuir para o desenvolvimento, caracterização e avaliação crítica de materiais que conciliem desempenho funcional e responsabilidade socioambiental. Assim, o presente trabalho reforça a importância de decisões baseadas em evidências técnicas para promover avanços consistentes rumo a sistemas produtivos mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022.

ALENCAR, M. V. et al. **Advancing plastic pollution hotspotting at the subnational level: Brazil as a case study in the Global South**. *Marine Pollution Bulletin*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115382>. Acesso em 21 de março de 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13230: Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis – Identificação e simbologia**. Rio de Janeiro (Brasil), 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE (ABREMA). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2025**. São Paulo: ABREMA, 2025.

BALIEIRO, Gabriela. **Logística reversa de embalagens: uma revisão acerca dos resultados obtidos após sua implementação**. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/3d808f88-b3ad-4c02-ac8f-fa3a3e567761>. Acesso em 29 de janeiro de 2026.

BARBATO, Andrey. PAMPLONA, João. **Os desafios para a difusão dos bioplásticos no Brasil**. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, v. 11, n. 3, 2022. Disponível em: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/10794. Acesso em 04 de fevereiro de 2026.

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

CAMARGO, Guilherme. **Estágio atual e desafios da reciclagem mecânica de plásticos de engenharia no Brasil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Química, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/262155>. Acesso em 04 de fevereiro de 2026.

DIAS, Yasmin. **Bioplásticos: desafios e aplicações**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Civil, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/045e89df-7a49-484e-99b9-cb336e69a210>. Acesso em 04 de fevereiro de 2026.

FARIAS, Alice. SCUR, Gabriela. **Processos de reciclagem de plásticos: tipos, vantagens e barreiras de adoção**. XIV Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI, 2024. Disponível em: https://fei.edu.br/sites/sicfei2024/2024/ARTIGO_027.pdf. Acesso em 04 de fevereiro de 2026.

FONTANA, Izabel. **Explorando o universo dos bioplásticos e de sua biodegradabilidade: uma revisão da literatura**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/47652>. Acesso em 04 de fevereiro de 2026.

ONU. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Organização das Nações Unidas (ONU), Brasil, 2026. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 29 de janeiro de 2026.

PATHAN, R. K.; AURISICCHIO, M. **Design framework for circular and sustainable packaging design**. *Proceedings of the Design Society*, 2025.

PEREIRA, Vanessa. **Inovações em embalagens sustentáveis: impacto econômico e ambiental na indústria global**. *Lumen et Virtus*, v. 16, n. 45, 2025. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/LEV/article/view/5532>. Acesso em 20 de julho de 2025.

PERES, Renato. BARBOSA, Juliano. SZILÁGYI, Gisele. **Centro de Reciclagem da Escola de Engenharia Mackenzie: um programa de extensão universitária voltado para a sustentabilidade**. *Ambiente & Educação: Revista de Educação Ambiental*, v. 30, n. 3, 2025. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/ambeduc/article/view/18337>. Acesso em 04 de fevereiro de 2026.

QUEIROZ, Fernanda. JABOTA, Luciana. **Frutificando Bioplástico – Embalagens biodegradáveis para o armazenamento de mudas e plantas**. 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia (CONICT). Instituto Federal de São Paulo (IFSP), 2024. Disponível em: <https://congressos.ifsp.edu.br/conict/article/view/509>. Acesso em 20 de julho de 2025.

RANGEL, Adrize. STARK, Fernanda. PEREIRA, Patrícia. RANGEL, Eduarda. CASTRO, Andréa. **Os 3Rs aplicados ao plástico: uma revisão sobre a redução, reutilização e reciclagem do plástico em tecnologias ambientais**. *Ciência e Trópico*, Recife, v. 47, n. 2, 2023. Disponível em: <https://periodicos.fundaj.gov.br/CIC/article/view/2213>. Acesso em 04 de fevereiro de 2026.

SILVA, Emiliania. SANTOS, Láissa. GARCIA, Célia. FARINAZZO, Kamila. **Logística reversa e marketing verde aplicado nas embalagens sustentáveis**. XII Guaratinguetá, SP. FATECLOG, 2021. Disponível em: <https://fateclog.com.br/anais/2021/parte2/787-1045-1-RV.pdf>. Acesso em 29 de janeiro de 2026.

TESTA, F. et al. **The drivers of sustainable consumer behavior: A systematic review and future research agenda**. *Journal of Cleaner Production*, 2022.

VALLE, Mariana. GUARNIERI, Patricia. FILIPPI, Amanda. **Adoção de embalagens plásticas sustentáveis agroalimentares: um olhar na dinâmica da produção orgânica e sustentável em face da Economia Circular**. *Interações*, Campo Grande, MS, v. 24, n. 1, 2023. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/inter/a/7LrQvW7sJpH4tKdKG9fXyng/?format=html&lang=pt>. Acesso em 29 de janeiro de 2026.

YADAV, K. et al. **Comprehensive analysis of bioplastics: life cycle assessment and environmental impact**. 2024.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11401513/>. Acesso em 21 de março de 2026.

ZENI, Cristiane. **Design de sistema de embalagem para a redução de custos e impactos ambientais em empresas**. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), 2024.

Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/277347>. Acesso em 29 de janeiro de 2026.