

Aqui Tem Química: Parte XIII. Plásticos Biodegradáveis e Sustentáveis

There is Chemistry Here: Part XIII. Biodegradable and Sustainable Plastics

Acácio Silva de Souza,^{*a}  Guilherme de Assis Luz Souza,^a Vitor Francisco Ferreira^{*a} 

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

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

Submissão: 4 de Junho de 2025 – Aceite: 4 de Março de 2026 – Publicado online: 13 de Março de 2026

This scientific dissemination work aims to compile, from the specialized literature, the technical concepts related to the main biodegradable synthetic polymeric materials and present them in an accessible and comprehensible manner. To this end, the study focuses on the synthetic polymers poly(lactic acid), polyhydroxybutyrate, polyhydroxybutyrate-co-valerate, poly(glycolic acid), and thermoplastic starch. The content will cover the applications of these materials, various preparation methods, their potential societal benefits, practical limitations, recent market data, and their effectiveness in reducing environmental pollution caused by plastics. From this analysis, the work seeks to assess the extent to which these alternatives represent viable strategies for addressing the environmental impacts associated with plastics (a broad term encompassing various moldable polymers), viewed through the lens of sustainable development. It is important to highlight that many biodegradable polymers and products derived from natural sources are already available on the market. Consequently, the central question under critical discussion in this text is whether biodegradable polymers can genuinely be considered sustainable solutions.

Keywords: Sustainable development; biodegradable materials; polymers; natural resources.

1. Introdução

Este artigo compõe a série de artigos “Aqui tem Química”, publicada anteriormente na RVQ e disponível também em livros (“Aqui tem Química” volumes 1 e 2), que discute, de forma simplificada, algumas áreas importantes da química com interface com a sociedade e com grande interesse industrial. Esses artigos desempenham um papel significativo na disseminação científica ao demonstrar como a química está presente em diversos aspectos do cotidiano.^{1,2}

Desde a produção, patenteamento e posterior industrialização do primeiro polímero plástico sintético, a baquelite, observou-se uma profunda transformação nos modos de vida e padrões de consumo da sociedade.^{3,4} Muitos produtos comerciais foram colocados no mercado com a baquelite para múltiplas aplicações. No entanto, esse marco histórico serviu de inspiração para a criação de milhares de polímeros sintéticos, genericamente denominados plásticos. As propriedades versáteis dos plásticos mostram que existem aplicações multifuncionais em praticamente todos os setores industriais. Contudo, a elevada durabilidade desses materiais, aliada ao descarte incorreto e à ausência de políticas eficazes de gestão de resíduos, culminaram em sérios impactos ambientais. Entre os problemas emergentes destacam-se a formação de extensas ilhas de macroplásticos em ambientes aquáticos e a disseminação de seus fragmentos, os chamados de microplásticos e nanoplásticos, que hoje representam uma preocupação crescente para os ecossistemas e a saúde pública.

2. O Início de Tudo: A Baquelite

O primeiro polímero sintético foi criado em 1907 pelo químico belga Leo Hendrik Baekeland (1863-1944) a partir da reação do fenol (1) com formaldeído (2) por aquecimento (Figura 1). Embora o processo químico utilizado por Leo Baekeland não fosse inteiramente novo, ele o reorganizou em três etapas distintas (Figura 1), o que se mostrou ideal para a formação de um novo material com propriedades endurecidas ao final do aquecimento. O resultado desse aprimoramento foi a baquelite (3), um polímero pertencente à família de resinas fenólicas ou poli (éteres acrílicos) que se destacou por não ser derivado

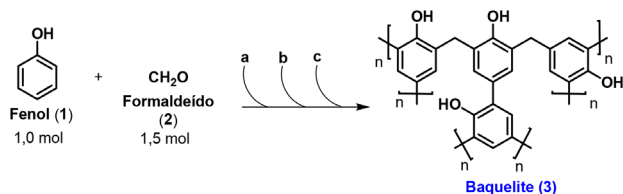


Figura 1. Esquema geral da reação do fenol com formaldeído sequencial em três etapas: (a) adição de formaldeído; (b) síntese de oligômeros (pré-polímeros); (c) reticulação dos oligômeros

de nenhuma substância natural, configurando-se como um marco na história dos materiais sintéticos.

O objetivo inicial de Baekeland era encontrar uma alternativa sintética à goma-laca, uma resina natural amplamente empregada como isolante elétrico. Contudo, as propriedades da baquelite como dureza, durabilidade, resistência ao calor e a agentes químicos, além de sua capacidade isolante, superaram significativamente suas expectativas. A baquelite revolucionou a indústria ao abrir caminho para o desenvolvimento de inúmeros produtos comerciais e consolidou, no meio científico, a ideia de que os polímeros sintéticos poderiam apresentar uma ampla gama de aplicações industriais. Pela primeira vez, os cientistas desenvolveram um polímero completamente sintético, não encontrado na natureza, com características moldáveis e versáteis. Seu impacto foi profundo, influenciando não apenas os campos da ciência e da tecnologia, mas também provocando transformações econômicas e sociais de grande alcance.

A baquelite é uma resina sintética curável que endurece irreversivelmente quando aquecida (etapa c, Figura 1), tendo sido muito usada em isolantes elétricos, invólucros de rádio, telefone, peças de automóveis, placas de circuito impresso, botões, pentes, artigos decorativos, puxadores de utensílios de cozinha, tampos de mesa e bandejas de laboratório

dentre muitas outras aplicações que requerem materiais não condutores e resistentes ao calor.⁵ No entanto, a baquelite apresenta desafios na reciclagem devido à sua natureza termofixa, impedindo que seja refundida e remodelada. Atualmente a produção da resina fenol-formaldeído é relativamente pequena em comparação com os outros plásticos mais versáteis e cicláveis.

Essas resinas podem ser sintetizadas com muitos outros fenóis e derivados fenólicos naturais. A pesquisa atual se concentra na melhoria das propriedades mecânicas e na reciclagem química, além de iniciativas em química sustentável, visando a produção de resinas a partir de biomassa, para atender às demandas ambientais.⁶

3. A Origem dos Plásticos Sintéticos de Fontes Fósseis: Poliestireno e Polietileno

Historicamente considerados materiais inertes, os plásticos passaram a ser reconhecidos, nas últimas décadas, como potenciais agentes de risco à saúde humana, especialmente devido à exposição a micropartículas (MPs) e nanopartículas plásticas (NPs). O termo “microplástico” foi proposto pela primeira vez por Thompson *et al.*⁷ em 2004 e se refere, no geral, a partículas de plástico com tamanho <5 mm. A Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos (EFSA) definiu “nanoplásticos” (NPs) como plásticos com uma faixa de tamanho de 1 nm a 100 nm. A principal fonte dos microplásticos (MPs >5 mm) e dos nanoplásticos (NPs >1 nm) no meio ambiente são os macroplásticos descartados (Figura 2).⁸

A trajetória dos plásticos no cotidiano foi significativamente influenciada por dois polímeros que desempenharam um papel pioneiro na expansão dos materiais sintéticos: o poliestireno (PS) (4) e o polietileno (PE) (5) (Figura 3). Ambos constituem marcos históricos e tecnológicos fun-

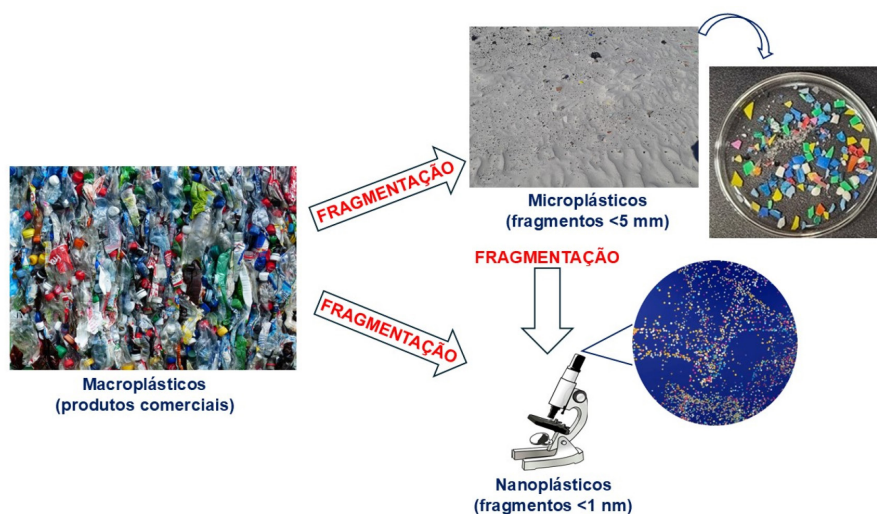


Figura 2. Classificação internacional dos plásticos pelo tamanho

damentais, tendo contribuído de maneira decisiva para a consolidação da era dos polímeros sintéticos e para sua ampla disseminação em diversas aplicações industriais e domésticas.

Entre os polímeros sintéticos mais prevalentes em descartes estão o polietileno (PE, majoritário), o poliestireno (PS) e o polipropileno (PP) (6). Junto com o amplo uso, apresentam potencial para reintegração em cadeias de economia circular, mas apenas cerca de 30% são coletados e reciclados.⁹ O polietileno (78,8%), polipropileno (78,8%) e poliestireno-MP (45,5%) foram os MPs mais frequentemente encontrados nos solos (Figura 3).¹⁰

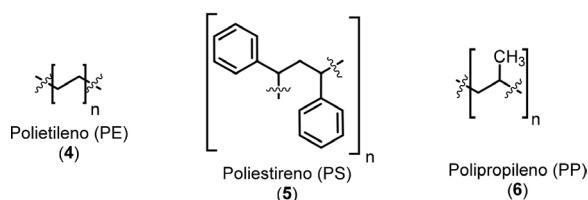


Figura 3. Os principais plásticos usados no mundo obtidos de fontes fósseis

Antes da era dos polímeros sintéticos derivados do petróleo, materiais naturais que solidificavam na presença do ar já eram conhecidos, como o *Styrax liquidus*, uma resina aromática natural obtida de árvores do gênero *Liquidambar*, especialmente *Styrax officinalis* e *Liquidambar orientalis*, comuns em toda a Ásia Menor. Essa resina natural era usada para impermeabilização de têxteis e outros materiais, sendo nomeada como estireno pelo farmacêutico alemão Johann Eduard Simon (1789-1856).¹¹ Em 1839 Simon aperfeiçoou o método de destilação do *Styrax liquidus* com uma solução de carbonato de sódio, obtendo um líquido incolor que após alguns dias converteu-se num sólido semelhante à borracha, chamado por Simon de óxido de estírol ou estírol (“styrol oxide”). Esta substância se transformava espontaneamente ao longo do tempo em um material sólido, sem que ele entendesse bem o porquê. O químico jamaicano John Buddle Blyth (1814-1871) e o químico alemão August Wilhelm von Hofmann (1818-1892) descobriram que o estírol solidificava na ausência de oxigênio,¹² mas foi Marcellin Berthelot (1827-1907), em 1866, quem identificou a formação do poliestireno como um processo de polimerização.¹³

A síntese do poliestireno só foi realizada em 1922 por Hermann Staudinge, sendo produzido industrialmente pela companhia alemã IG Farbenindustrie a partir de 1930, sendo considerado o primeiro polímero sintético derivado do petróleo a ser produzido em larga escala comercialmente. Atualmente o poliestireno é um dos polímeros sintéticos mais usados em todo mundo em centenas de aplicações.¹¹ Porém, devido à sua alta persistência e efeitos tóxicos, é

também um dos polímeros mais perigosos para a saúde humana e para o meio ambiente. Ele é classificado pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC) como uma substância potencialmente cancerígena (classe de carcinogenicidade B2). Os microplásticos e os nanoplásticos desse polímero se acumulam ao longo da cadeia alimentar e têm potenciais efeitos adversos nos organismos vivos.¹⁴

O polietileno (PE), assim como o poliestireno, são dois dos polímeros mais produzidos no mundo. O PE foi produzido acidentalmente em 1933 pelos químicos Eric W. Fawcett (1908-1987) e Reginald O. Gibson (1902-1983)¹⁵ da Imperial Chemical Industries enquanto realizavam experimentos com gás eteno. Eles descobriram que o gás eteno misturado com benzaldeído, sob alta pressão/temperatura na presença de peróxido orgânico, formava uma substância branca e cerosa que foi identificada como polietileno de baixa densidade. Em 1939 outro cientista da mesma empresa, Michael Willcox Perrin (1905-1988), conseguiu reproduzir o experimento de forma controlada, marcando o início da produção industrial do polietileno.

As propriedades físico-químicas do PE conferem a ele uma notável versatilidade. Trata-se de um polímero termoplástico que pode ser facilmente moldado, transformado em fibras ou filmes, além de apresentar características hidrofóbicas, ser eletricamente isolante e quimicamente inerte na maioria das condições ambientais. Essas qualidades tornaram o PE altamente atrativo para aplicações industriais e comerciais, especialmente após a Segunda Guerra Mundial, quando sua produção foi intensificada e passou a ser economicamente viável em larga escala.

Com o avanço da petroquímica e a consolidação das técnicas de polimerização controlada, o polietileno se tornou um dos plásticos mais utilizados globalmente. Sua aplicação abrange desde a fabricação de recipientes para alimentos, produtos de limpeza, higiene pessoal, cosméticos e medicamentos, até a produção de embalagens flexíveis, filmes plásticos, sacolas, utensílios domésticos e recipientes herméticos. A combinação entre custo reduzido, estabilidade química e facilidade de processamento consolidou o polietileno como um dos pilares da indústria de materiais poliméricos contemporânea.

4. Os Problemas dos Plásticos Derivados do Petróleo

“A creative and convenient invention, found in almost every object and household is killing the most precious thing mankind has ever known - the planet” Kinsley Anderson.¹⁶

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), a produção global de plásticos

ultrapassa atualmente 430 milhões de toneladas por ano,¹⁷ dos quais cerca de dois terços correspondem a produtos de vida útil curta, frequentemente descartados em poucos meses após o uso. A produção global foi cerca de 400 milhões de toneladas de plásticos apenas em 2022, material que em algum momento da sua vida útil se tornará um resíduo.¹⁸ O aumento da produção de polímeros plásticos para uma função específica trouxe consigo o aumento da geração de rejeitos e acúmulo ambiental, devido ao seu descarte facilitado. Estima-se que aproximadamente 4,9 bilhões de toneladas de resíduos plásticos, com ampla variação em tamanho e composição química, já tenham sido liberadas nos ecossistemas terrestres e aquáticos, com 52 milhões de toneladas de resíduos plásticos sendo lançadas anualmente no meio ambiente, afetando diretamente a biodiversidade e contribuindo para a degradação de ecossistemas terrestres e aquáticos.^{19,20} As projeções indicam que até 2050 esse quantitativo deve aumentar 700 milhões e 12 bilhões de toneladas métricas de resíduos plásticos deveram entrar nos ambientes naturais.^{21,22}

O descarte inadequado dos macroplásticos contribui significativamente para a poluição ambiental, uma vez que esses resíduos são frequentemente transportados para rios e oceanos onde se acumulam e agredem a fauna e a flora. Essas concentrações de plástico são problemáticas por vários motivos: afetam a vida marinha, transportam espécies invasoras que se fixam nos detritos e cruzam oceanos, formam microplásticos e nanoplásticos e liberam plastificantes, que são substâncias tóxicas. Um exemplo do problema ocasionado pelo descarte e acúmulo de resíduos plásticos encontra-se no oceano Pacífico. Este oceano apresenta alta concentração de resíduos plásticos que ficam suspensos em coluna d'água ou flutuando na superfície. O acúmulo mais conhecido é a Grande Ilha de Lixo do Pacífico (*Great Pacific Garbage Patch*), localizada entre a Califórnia e o Havaí.²³ Essa região, que se formou por ação das correntes oceânicas (os chamados giros oceânicos), contém entre 45-129 mil toneladas desde macroplástico até microplásticos dentro de uma área de 1,6 milhão de km² que continua crescendo. Esse é um problema gravíssimo e complexo, com múltiplas possibilidades de solução. De todo o plástico produzido, 72% acabam em aterros sanitários ou como lixo, 19% são incinerados e apenas 9% são reciclados.²⁴

O aspecto mais preocupante dos macroplásticos são as transformações destes materiais em ambientes terrestres e, principalmente, aquáticos como processos de fragmentação mecânica, foto-oxidação induzida pela radiação ultravioleta solar e o estresse mecânico, impulsionando a degradação e fragmentação de resíduos plásticos maiores em micro- e nanoplásticos menores.²⁵⁻²⁷

5. Os Plásticos Biodegradáveis e Sustentáveis

O principal problema associado à produção de plásticos e seus derivados reside no uso de matérias-primas provenientes de fontes não renováveis, majoritariamente de origem fóssil. Além disso, destaca-se a limitada degradabilidade desses materiais, o que resulta na sua persistência no ambiente sob a forma de resíduos inertes, acumulando-se em ecossistemas terrestres e aquáticos. Adicionalmente, a cadeia produtiva de plásticos contribui significativamente para a crise climática, uma vez que os processos de fabricação são altamente intensivos em energia e as etapas de obtenção dos monômeros, a partir de derivados petroquímicos, envolvem operações termoquímicas que liberam consideráveis volumes de gases de efeito estufa.

A demanda atual por polímeros de base biológica, para maior sustentabilidade e menor pegada de carbono, está sendo considerada como de urgência por agências nacionais e internacionais devido o esgotamento alarmante dos recursos fósseis, o aquecimento global simultâneo e às questões ambientais. Uma possível solução para mitigar os efeitos adversos dos plásticos derivados de fontes fósseis está no desenvolvimento de biopolímeros e polímeros bioderivados sustentáveis (fontes renováveis) e biodegradáveis. O plástico biodegradável é um material polimérico que se decompõe em tempo reduzido por ação de micro-organismos naturais, como bactérias, fungos e algas, em condições ambientais específicas, resultando em substâncias simples como dióxido de carbono (CO₂), água, biomassa e, em condições anaeróbicas, eventualmente metano (CH₄), sem deixar resíduos tóxicos persistentes.

Apesar de serem termos semelhantes e de poderem ser obtidos de fontes naturais renováveis, biopolímeros e polímeros bioderivados compõem classes diferentes de substâncias. Biopolímeros são polímeros de origem natural obtidos a partir de organismos vivos, como a celulose dos vegetais e as proteínas de origem animal, presentes na seda e na quitina.²⁸ Já os polímeros bioderivados são polímeros compostos parcialmente ou totalmente por materiais de origem natural, como o bio-PET, que é composto por 30% de etilenoglicol de origem natural, obtido a partir do amido ou pela desidratação do etanol da cana-de-açúcar.²⁸ Outro conceito bastante importante é o de polímeros biodegradáveis, que são polímeros que se degradam em pequenas partículas quando expostos a processos aeróbicos, anaeróbicos, água ou microrganismos.²⁹ Os polímeros de origem natural possuem como grandes vantagens uma melhor aceitação biológica e uma menor toxicidade, além de serem ecologicamente mais amigáveis, por se tratarem, na sua maioria, de materiais biodegradáveis, gerando resíduos que podem ser reinseridos nos ciclos biológicos naturais.

Embora existam tecnologias viáveis para a produção desses materiais, a escala de produção ainda é limitada, e o interesse por parte dos grandes conglomerados químicos permanece restrito. O baixo incentivo a alternativas mais ecológicas está intimamente ligado a questões econômicas, políticas e estruturais, o que dificulta a transição para práticas mais sustentáveis na indústria petroquímica. Isso se deve, em grande parte, à preferência dessas indústrias pelo uso do petróleo como matéria-prima, devido à sua abundância e custo relativamente baixo, além da infraestrutura consolidada para a produção de plásticos convencionais (Figura 4). Como resposta à crescente preocupação ambiental surgiram como uma solução promissora, dentre tantas, os bioplásticos.

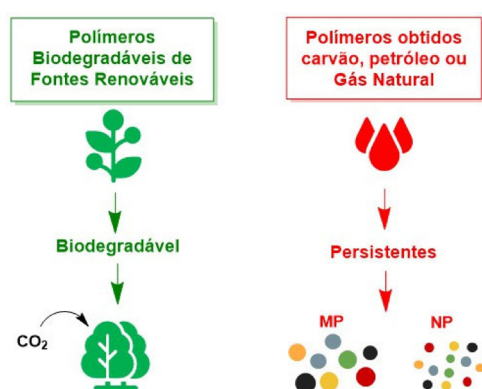


Figura 4. Polímeros biodegradáveis de fontes renováveis vs polímeros convencionais de petróleo e gás natural

As atuais metas da comunidade científica concentram-se no desenvolvimento de novos métodos e produtos que reduzam os custos e otimizem o desempenho dos materiais de base biológica. Essa busca é essencial, uma vez que, caso os plásticos biodegradáveis permaneçam no solo, na água ou nos oceanos por longos períodos antes de sua completa degradação, seu potencial para mitigar os impactos ambientais será significativamente limitado. Os bioplásticos são fabricados a partir de materiais monoméricos, poliméricos e polímeros naturais, como o ácido láctico e o amido.³⁰ Esses materiais podem contribuir para um ciclo de vida dos plásticos comerciais mais sustentável como parte de uma economia circular. Em comparação com os plásticos de origem fóssil, os plásticos de base biológica podem ter uma pegada de carbono menor e exibir propriedades vantajosas, serem compatíveis com os fluxos de reciclagem existentes, além de alguns oferecem biodegradação. Alguns cenários

negativos podem ser destacados como o impacto agrícola causado pela competição com a produção de alimentos, escala de produção e escolhas de compra. Também é importante destacar que nem todo plástico de origem vegetal é biodegradável e compostável, com o tempo de biodegradação variando conforme o tipo de polímero e o ambiente (solo, água, compostagem industrial etc.).

Um plástico compostável é um subtipo de plástico biodegradável que se decompõe totalmente em um prazo definido (geralmente até 180 dias) em ambiente de compostagem, virando composto orgânico (húmus), CO₂ e água, sem deixar resíduos tóxicos ou fragmentos plásticos. Eles podem ser divididos em dois tipos: compostáveis industriais, que precisam de altas temperaturas e condições controladas (ex. ácido polilático (PLA)) e compostáveis domésticos, que se decompõem em composteiras ambientais espontâneas (ex. filmes de tereftalato adipato de polibutileno (PBAT)). É importante destacar que mesmo que um plástico seja biodegradável e se decomponha mais rapidamente, isso não significa que ele não cause impactos ambientais. Durante a degradação, podem ser liberados microplásticos e nanoplasticos, aditivos químicos (plastificante, metais e corantes) ou até gases de efeito estufa (como metano, em ambientes anaeróbicos).

Os oxibiodegradáveis (ou oxodegradáveis) são plásticos tradicionais (ex. polietileno e polipropileno) com aditivos pró-degradantes, como sais metálicos, que fazem o material se fragmentar com exposição ao calor, luz ou oxigênio. Porém, degradação é física/química e não biológica, criando fragmentos de microplásticos, que persistem no ambiente. A Tabela 1 sintetiza os termos mais relevantes relacionados aos polímeros biodegradáveis, oferecendo definições e descrições que auxiliam na compreensão das diferentes categorias e características desses materiais.

A ideia de um plástico de fonte renovável biodegradável, em princípio é bem simples, mas as tecnologias para se alcançar esse objetivo são mais complexas do que parece. A principal vantagem é a biodegradação, evitando o acúmulo de resíduos, no entanto tem que se levar em consideração outros aspectos relacionados com a sustentabilidade. A biodegradação é o processo pelo qual micro-organismos consomem materiais e os transformam em elementos naturais, como água, dióxido de carbono (ou metano, em ambientes anaeróbicos) e biomassa. Dois tipos que se enquadram nos plásticos biodegradáveis (Figura 5): plásticos bioderivados, como PLA (7) e poli-

Tabela 1. Termos que estão relacionados com os polímeros biodegradáveis

Tipo	Origem	Degradação Completa?	Precisa de Compostagem?	Deixa Microplástico?
Biodegradável	Variada	Sim, com o tempo	Às vezes	Não (idealmente)
Compostável	Variada	Sim, em até 180 dias	Sim (industrial ou doméstica)	Não
Oxibiodegradável	Fóssil	Não necessariamente	Não	Sim

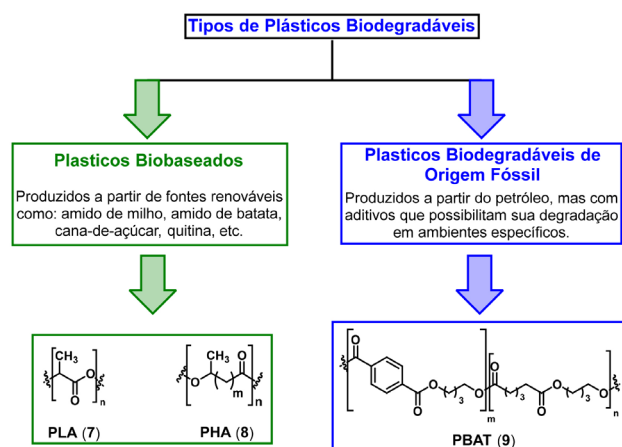


Figura 5. Tipos de plásticos biodegradáveis

hidroxialcanoatos (PHA) (8) e plásticos biodegradáveis de origem fóssil como PBAT (9). É importante destacar que certos plásticos rotulados como biodegradáveis só se degradam eficientemente em sistemas de compostagem industrial, os quais, por sua vez, são escassos em muitas regiões do mundo. A sinalização como biodegradável pode induzir o consumidor a um descarte irresponsável, sob a falsa impressão de que esses produtos desaparecerão facilmente no ambiente.

No futuro próximo, prevê-se que os plásticos biodegradáveis passem a coexistir em maior escala com os plásticos convencionais nos fluxos de resíduos sólidos urbanos. Essa convivência poderá acarretar sérios desafios para os sistemas tradicionais de reciclagem, uma vez que a contaminação cruzada, resultante da mistura de materiais com diferentes propriedades físico-químicas e perfis de degradação, tende a comprometer a eficiência dos processos de triagem, reciclagem mecânica e qualidade dos materiais reciclados. Tal cenário reforça a necessidade de estratégias de gestão e separação adequada desses materiais ao longo da cadeia de resíduos.

A pesquisa científica sobre novos materiais e tecnologias de biodegradação tem se mostrado dinâmica, indicando a viabilidade de soluções mais eficazes e ambientalmente compatíveis no médio e longo prazo. Neste sentido, existem diversos tipos de polímeros biodegradáveis disponíveis

comercialmente, cada um com aplicações específicas e vantagens ambientais.

6. Poli(ácido láctico) (PLA)

Dentre os polímeros biodegradáveis, o poli(ácido láctico) (PLA) (7) destaca-se como o polímero de maior produção, o mais investigado e o mais aplicado na fabricação de produtos de uso cotidiano, devido às suas propriedades físico-químicas favoráveis e ao potencial de biodegradabilidade em ambiente controlado. Este polímero termoplástico é considerado uma alternativa viável para a substituição parcial de polímeros sintéticos derivados de fontes fósseis em diversas aplicações industriais. Trabalhos de revisão recentes sobre alternativas sintéticas para produzir o PLA enfatizam as técnicas desenvolvidas na última década e discutem vários métodos de polimerização e técnicas de modificação para melhorar as propriedades dos polímeros (Figura 6).³¹

O processo de síntese do PLA pode ocorrer por dois principais métodos: a) policondensação direta do ácido láctico (10) ou b) polimerização por abertura de anel do lactídeo (11), uma molécula cíclica obtida a partir do próprio ácido láctico por diversos processos, como por exemplo, desidratação via destilação de percurso curto sob catálise (ex. óxido de zinco). A policondensação direta, é o principal método de produção de PLA e embora mais simples apresenta limitações na obtenção de polímeros de alta massa molar devido à dificuldade em remover água do sistema de reação, o que compromete o grau de polimerização. A polimerização por abertura do anel do lactídeo requer iniciadores (que podem incluir solventes ou uma quantidade traço de água) e catalisadores. Por sua vez, a polimerização por abertura de anel permite a produção de PLA com melhores propriedades mecânicas e térmicas, ampliando suas possibilidades de aplicação industrial. O monômero ácido láctico é obtido via fermentação microbiana de açúcares simples e polissacarídeos provenientes de matérias-primas renováveis, tais como amido de milho, xarope de glicose, sacarose da cana-de-açúcar e da beterraba.

O PLA apresenta boa resistência mecânica, transparência

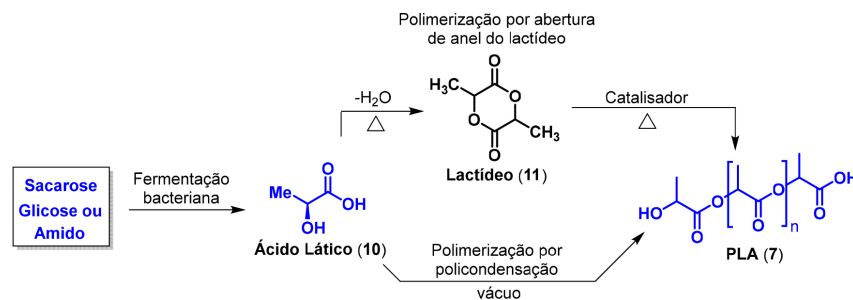


Figura 6. Principais métodos de produção do PLA

e processabilidade térmica, características que o tornam apto para a fabricação de utensílios descartáveis (embalagens, garrafas, pratos, copos, sacos de resíduos), revestimentos (parede, papel e papelão), fibras (vestuário, tapetes, lençóis e toalhas), dispositivos biomédicos (suturas, materiais protéticos), impressora 3D, filmes plásticos, filamentos para impressão 3D etc. Além disso, por ser derivado de fontes vegetais, sua produção contribui para a redução do uso de insumos petroquímicos e de resíduos plásticos de degradação longa, derivados do petróleo. O Tamanho do mercado global do PLA foi avaliado em 715,4 milhões de dólares em 2023 e deve crescer de 850,3 milhões de dólares em 2024 para 3240,4 milhões de dólares em 2031, exibindo uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 21,06%.³²

A biodegradação do PLA ocorre em sistemas de compostagem industrial a temperaturas em torno de cerca de 60 °C e elevada umidade, não se decompondo eficientemente em ambientes naturais como oceanos, rios ou solos de temperatura moderada. Isso significa que, na ausência de infraestrutura adequada para seu descarte e tratamento, o PLA pode persistir no ambiente de maneira semelhante aos plásticos convencionais e formar microplásticos.

7. Poli-hidroxialcanoatos (PHA)

Os poli-hidroxialcanoatos (PHA) (8) são poliésteres 100% biodegradáveis e compostáveis, derivados de ácidos de ácidos carboxílicos hidroxilados na cadeia alquílica. Em ambientes naturais esses PHAs produzidos naturalmente por micro-organismos, como diversos grupos de bactérias e arqueas (ou archeas), a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais, açúcares e resíduos orgânicos. Arqueas são micro-organismos procariontes unicelulares, parecidos com bactérias, mas com domínio biológico próprio. São considerados promissores para reduzir a dependência de plásticos derivados de petróleo e para minimizar o impacto ambiental, especialmente em relação ao lixo plástico fóssil.^{33,34} As bactérias acumulam esses polímeros como uma forma de reserva de energia e carbono quando cultivadas em meio nutritivo com excesso de carbono e limitação de outros nutrientes (como nitrogênio ou fósforo). O polímero é então extraído e purificado para uso industrial. Os PHAs são produzidos por bactéria Gram-negativas (ex. *Pseudomonas putida* e *Pseudomonas aeruginosa*, *Cupriavidus necator*, *Alcaligenes latus* e *Azotobacter beijerinckii* etc.) e Gram-positivas (*Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus drentensis* etc.).³⁵

A estrutura de um PHA pode ser alterada por métodos físico, químicos ou biológicos para produzir um novo polímero com variações previsíveis em suas funções e peso molecular. Essas modificações alteraram suas propriedades

mecânicas, seu caráter anfifílico, sua estrutura superficial e sua taxa de degradação para atender aos requisitos para suas aplicações específicas em diferentes campos.^{35,36}

A maior vantagem desses polímeros é que se decompõem em ambientes naturais (solo, água doce, marinho) também por ação de micro-organismos sem deixar microplásticos. São polímeros que variam de flexíveis a rígidos, dependendo do tipo de PHA e de como são produzidos. Devido à matriz de produção biológica não causam toxicidade (biocompatíveis), sendo usados em muitas aplicações médicas (como suturas e cápsulas para medicamentos). O custo de produção ainda alto em relação aos plásticos derivados de petróleo e até a alguns bioplásticos, como o PLA. Algumas desvantagens tornam o PHA menos atrativo para aplicações que necessitem de grandes quantidades. A sua produção em escala industrial ainda é limitada e o processo de produção é complexo, envolvendo cultivo de micro-organismos e a extração do polímero de dentro das células. A estabilidade térmica e mecânica desses polímeros é menor quando comparadas as de plásticos convencionais usados em aplicações como uso em altas temperaturas ou em embalagens de longa vida.

O mercado está em crescimento significativo, impulsionado pela crescente demanda por alternativas sustentáveis aos plásticos convencionais. Outros fatores que impulsionam esse mercado são: a conscientização ambiental, regulamentações mais rigorosas sobre plásticos não biodegradáveis, inovação tecnológica e a expansão da capacidade de produção.³⁷ De acordo com a Prismane Consulting o tamanho do mercado global de PLA deve crescer a uma CAGR de 19,4% para atingir 6 bilhões de dólares até 2032, saindo dos atuais 1,2 bilhão de dólares. Outras consultorias sobre mercado indicam que até 2032 o mercado de PLA terá uma CAGR de 29,3%.³⁸ Exemplos de dois tipos de PHA: PHB (poli-hidroxibutirato) e PHBV (poli-hidroxibutirato-co-valerato). A Figura 7 resume as relações entre PHA (9), PHB (12) e PHBV (13).

8. Poli-hidroxibutirato (PHB)

O PHB (12) é o poliéster obtido de bactérias mais estudado, pois apresenta propriedades químicas e mecânicas semelhantes ao polipropileno (PP).³⁹ Ele é um termoplástico biodegradável sintetizado por fermentação de matérias-primas renováveis. Esse polímero é um material insolúvel em água, pouco permeável ao O₂, H₂O e CO₂, duro e quebradiço que escoa facilmente durante o processamento. A bactéria *Cupriavidus necator* é o micro-organismo mais usado e fácil de cultivar para produzir PHB industrialmente, armazenando o polímero em até 80% de sua massa celular seca sob condições de limitação de nutrientes e excesso de carbono. As biomassas usadas

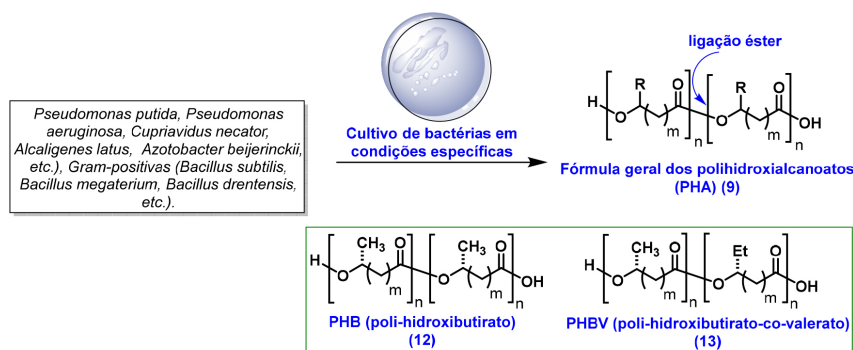


Figura 7. Estruturas do biopolímeros PHB e PHBV

como fonte de carbono variam entre glicerol, resíduos de laticínios, algas, resíduos agroindustriais, resíduos da indústria alimentícia e açúcares.⁴⁰ Segundo a Verified Market Research, o mercado do PHB foi avaliado em 178 milhões de dólares em 2024, com projeção de alcançar 643 milhões de dólares até 2032, apresentando uma CAGR de 15,9% entre 2026 e 2031.⁴¹

São muitas aplicações do PHB em diferentes setores industriais. Seus usos mais frequentes são: sacolas, filmes, canudos, potes, copos e talheres descartáveis e bandejas para alimentos. Na área médica e agrícola são utilizados em fios de sutura biodegradáveis, dispositivos de liberação controlada de medicamentos, tecidos suporte para crescimento celular, filmes agrícolas biodegradáveis para cobertura de solo e liberação controlada de fertilizantes e pesticidas etc.⁴²

9. Poli-hidroxibutirato-co-valerato (PHBV)

A família de polímeros PHBV (13) alterna as unidades 3-hidroxibutirato (3HB) e 3-hidroxivalerato (3HV) e pertencem à grande família dos poli-hidroxicanoatos (PHAs), uma modificação que confere aos PHBVs maior flexibilidade, menor cristalinidade e melhor processabilidade térmica, tornando-os mais adequados para aplicações que exigem materiais menos quebradiços. São alternativas promissoras aos plásticos à base de petróleo por serem biodegradáveis, biocompatíveis e derivados de fontes renováveis. Eles são obtidos por fermentação bacteriana em diferentes condições. A escolha dos micro-organismos e as biomassas fontes de carbono (sacarose, glicose, frutose, glicerol, ácidos orgânicos, óleos, ácidos graxos voláteis, resíduos agrícolas etc.) são cruciais para a obtenção de diferentes PHBV. Algumas cepas selvagens e espécies modificadas podem produzir grandes quantidades de PHBV. Os PHBVs representam uma solução inovadora frente aos desafios ambientais associados aos plásticos convencionais. Suas propriedades únicas e a versatilidade de aplicações o posicionam como um material-chave na transição para uma economia mais sustentável e circular.

Cepas de bactérias *Ralstonia eutropha*, *Paracoccus denitrificans*, *Azotobacter vinelandii* e *Escherichia coli* geneticamente modificadas mostraram potencial aplicação na produção de PHBV sob condições específicas. A proporção entre as unidades 3HB e 3HV afeta as propriedades mecânicas e térmicas do PHBV. Quimicamente, o PHBV pode ser sintetizado por policondensação a partir da butirolactona e valerolactona na presença de catalisadores como aluminoxano oligomérico (compostos organometálicos formados por alumínio, oxigênio e grupos alquila organizados em cadeias ou ciclos curtos).

O PHBV é solúvel em solventes como clorofórmio e suas propriedades mecânicas são semelhantes às do polipropileno, porém com maior flexibilidade e menor fragilidade em comparação ao PHB puro.⁴³ Esses biopolímeros possuem várias aplicações devido às suas propriedades superiores em comparação com outros poliésteres e biopolímeros, utilizados na produção de embalagens filmes, recipientes para alimentos biodegradáveis, fios de sutura e polímero para liberação controlada de fármacos.

Em 2024, o mercado global dos PHBVs foi estimado em aproximadamente 13,55 bilhões de dólares, com projeção de crescimento para 48,55 bilhões de dólares até 2034, representando uma CAGR de 13,61% entre 2025 e 2034. Esse crescimento é impulsionado pela crescente demanda por materiais biodegradáveis e sustentáveis em diversos setores industriais.⁴⁴

10. Poli(ácido glicólico) (PGA)

O ácido glicólico (AG) (14) pertence à classe dos ácidos α -hidroxílicos, similar ao PLA, tendo menor massa molecular pois tem dois átomos de carbono: um compondo um grupo carboxílico e o outro ligado a um grupo hidroxila. Esse ácido é extremamente hidrofílico e, especificamente, muito utilizado em prática dermatológica, pois são cosméticos de peelings superficiais ou de média profundidade.⁴⁵ O ácido glicólico pode ser obtido da cana-de-açúcar e está se tornando cada vez mais popular devido à sua ampla gama de aplicações em uma variedade de indústrias.

Os cosméticos contendo AG têm efeitos anti-inflamatório, fotoprotetor e antienvelhecimento da pele,⁴⁶ antiacne, exfoliante, redutor de manchas, queratolítico e antioxidantes e esfoliante.⁴⁷ Para além dos seus efeitos cosméticos, o AG é usado, principalmente, na produção do PGA (15), um polímero sintético biodegradável, e na área têxtil é usado como agente de acabamento para melhorar qualidades do tecido, como maciez e absorção.⁴⁸ Em 2024 o tamanho do mercado internacional de AG ultrapassou 295,68 milhões de dólares e deve atingir o valor de cerca de 461,74 milhões de dólares até 2032. A crescente demanda por AG faz com que o mercado cresça a uma CAGR de 5,73% entre 2026 e 2032.⁴⁸

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para a produção de AG, por vias químicas e microbiológicas, com uma variedade de microrganismos sendo capazes de sintetizar AG a partir de diferentes fontes de biomassa. Como exemplo, destacam-se as leveduras *Pichia naganishii* AKU 4267 e *Rhodotorula* sp. 3Pr-126, que demonstram alta eficiência na oxidação do etilenoglicol a AG, com rendimentos molares de até 88% e 92%, respectivamente.⁴⁹

No que diz respeito à rota química, uma das fontes utilizadas é o ácido cloroacético, o qual pode ser hidrolisado em meio alcalino, substituindo-se o átomo de cloro por um grupo hidroxila.⁵⁰ A carbonilação do formaldeído, promovida por catalisadores específicos, permite a obtenção de AG a partir das unidades intermediárias geradas nesse processo.⁵¹

O PGA, por sua vez, é um polímero amplamente utilizado nas mais diversas áreas devido às suas propriedades degradáveis e pela sua alta absorvidade em implantes médicos bioabsorvíveis (ex. suturas, stents e parafusos ortopédicos etc.), sistemas de liberação controlada de fármacos, embalagens biodegradáveis, na indústria de petróleo e gás é usado em operações de fraturamento hidráulico (processo de fracking).⁵² Atualmente, o crescimento do mercado do PGA está sendo impulsionado pela crescente demanda por materiais poliméricos biodegradáveis. Em 2025, segundo dados da empresa de consultoria Global Market Insights Inc, o mercado global do PGA foi estimado em aproximadamente 5,6 bilhões de dólares, com uma CAGR projetada de mais de 8,9% entre 2026 e 2035.⁵³

O processo de preparação de PGA (15) pela condensação direta do ácido glicólico é a mais antigas do ponto de vista histórico e consiste na policondensação do AG (14) para formar ligações ésteres, liberando água como subproduto. A reação é limitada por equilíbrios termodinâmicos, volatilidade do ácido glicólico e pela formação de oligômeros de baixo peso molecular.⁵⁴ Todavia, a principal rota de síntese do pol PGA (15) é a polimerização por abertura de anel (ring-opening polymerization – ROP) do dímero cíclico do ácido glicólico, conhecido como glicolídeo (16).⁵⁵ Esse processo é geralmente catalisado por compostos como o octoato de estanho ($\text{Sn}(\text{Oct})_2$) ou óxidos de zinco, que promovem a abertura do anel e a propagação da cadeia polimérica (Figura 8). A reação é conduzida sob condições anidras e temperaturas controladas, visando a obtenção de polímeros com alto peso molecular e boa regularidade estrutural.^{56,57} Para a síntese do glicolídeo (dímero) é usado aquecimento abaixo de 180 °C, pressão reduzida leve (~10–50 mmHg) ou atmosfera inerte com arraste de gás para remover a água gerada reduzindo a chance de oxidação térmica (Figura 8).

11. Amido Termoplástico (TPS)

O amido, um polissacarídeo natural comestível constituído por unidades de D-glicose unidas, predominantemente, por ligações glicosídicas α -1,4, destaca-se por sua ampla disponibilidade, baixo custo e caráter renovável, o que o torna um candidato promissor para aplicações sustentáveis, especialmente na formulação de materiais biodegradáveis.⁵⁸ Entretanto, sua estrutura altamente ordenada, marcada por intensas interações intermoleculares e pela formação de extensas redes de ligações de hidrogênio entre as cadeias de amilose e amilopectina, impõe limitações significativas ao seu processamento térmico.⁵⁹ Essa resistência à fusão sob aquecimento convencional compromete seu desempenho como material termoplástico na sua forma nativa. Em função disso, diversas estratégias de modificação química e física vêm sendo empregadas ao longo das últimas décadas com o objetivo de superar tais limitações. Tais modificações visam alterar a estrutura molecular do amido, reduzindo a intensidade das interações intermoleculares, promovendo a gelatinização e conferindo-lhe propriedades

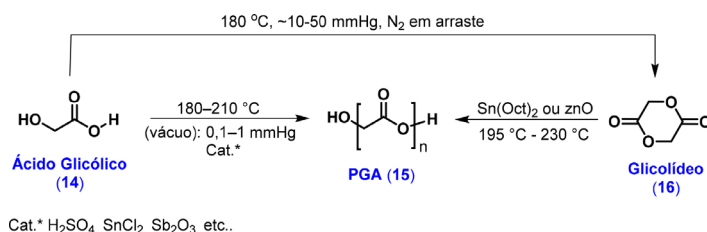


Figura 8. Métodos de preparação do PGA

termoplásticas adequadas. Centenas de processos já foram propostos e desenvolvidos, incluindo a adição de plastificantes, reações de esterificação e oxidação, bem como modificações enzimáticas, todas com o intuito de ampliar sua aplicabilidade em escala industrial e sua eficácia ambiental.⁶⁰

O amido termoplástico (TPS) (17) (Figura 9) é um bioplástico produzido pela desestruturação das cadeias dos polissacarídeos amilose e amilopectina que compõem o amido natural, seja ele derivado do amido de milho, batata, mandioca ou trigo. A desestruturação das cadeias ocorre por meio de processamento térmico e mecânico na presença de um plastificante como, glicerol (mais comum), sorbitol, ureia e outros polióis. O processo envolve o aquecimento do amido na presença de umidade em uma extrusora de rosca dupla a temperaturas entre 90-180 °C, que quebra a estrutura cristalina dos grânulos de amido e facilita a formação de um material termoplástico homogêneo.⁶¹ Esse processo é similar à gelatinização do amido, tornando o material flexível e processável por fusão. A adição do glicerol ajuda a quebrar as ligações de hidrogênio dentro dos grânulos de amido, diminuindo seu ponto de fusão e aumentando sua flexibilidade, como destacado na Figura 9. As ligações de hidrogênio entre as moléculas de amido são substituídas por interações supramoleculares com as moléculas do plastificantes. Esse material é processado por extrusão em filmes, pellets ou formas pré-moldadas usando equipamentos convencionais de processamento de polímeros.⁶²

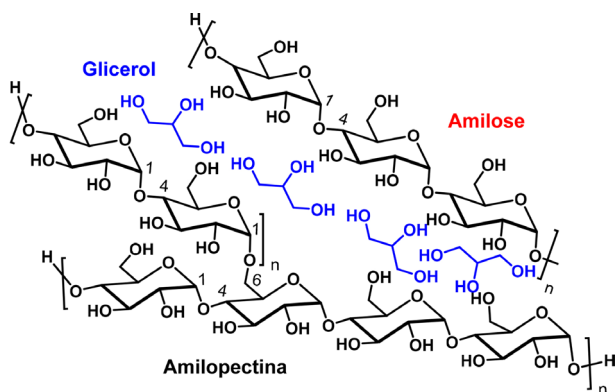


Figura 9. Intercalação do glicerol nas cadeias do amido termoplástico (TPS)

Apesar das vantagens da biodegradabilidade do TPS, que se alinham com as metas globais de sustentabilidade, desvantagens técnicas constituem-se como desafios a serem superados, tais quais a baixa hidrofiliabilidade e algumas limitações mecânicas. No entanto, essas desvantagens, atualmente, podem ser contornadas pela mistura do TPS com outros materiais, reticulação ou o uso de nanocompósitos.

Devido às características de sustentabilidade, biodegradabilidade, renovabilidade e baixo custo, há muitas aplicações do amido termoplástico tais como: sacolas descartáveis, filmes de embalagem, embalagens de espuma, vasos de plantas, transportadores de fertilizantes de liberação lenta, sistemas de administração de medicamentos, tecidos para curativos para feridas, impressão 3D, formulações e compósitos.⁶³

Há uma demanda crescente e urgente por materiais sustentáveis e biodegradáveis, especialmente no setor de embalagens, o qual figura entre os principais responsáveis pela geração de resíduos de macroplásticos. Nesse contexto, o mercado global do TPS tem apresentado um crescimento expressivo, impulsionado pelas exigências sociais por alternativas ambientalmente responsáveis. Em 2021, o mercado de TPS foi avaliado em 200,56 milhões de dólares, com projeções que indicam um aumento para 397,02 milhões de dólares até 2030, representando uma CAGR de 7,88%.⁶⁴

12. Considerações Finais

Os plásticos biodegradáveis despontam como uma inovação tecnológica com potencial para reduzir os impactos ambientais dos plásticos convencionais. No entanto, não constituem uma solução definitiva. A eficácia desses materiais está condicionada a múltiplos fatores, como sua composição, o ambiente de descarte, a infraestrutura de compostagem disponível e o comportamento dos consumidores. A simples substituição de plásticos tradicionais pelos biodegradáveis, sem uma mudança estrutural nos padrões de consumo e descarte, tende a ser insuficiente. A sustentabilidade desses materiais depende de uma abordagem sistêmica, que envolva políticas públicas eficazes, educação ambiental, investimentos em infraestrutura e inovação interdisciplinar. Sem essas condições, mesmo os materiais biodegradáveis mais avançados podem gerar impactos semelhantes aos dos plásticos convencionais. Além disso, a produção de bioplásticos a partir de matérias-primas alimentares, como milho e cana-de-açúcar, suscita questões éticas relevantes, sobretudo em regiões com insegurança alimentar e pressão sobre o uso da terra. A utilização de cultivos agrícolas para fins industriais deve ser cuidadosamente avaliada à luz da justiça social e ambiental.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq e à FAPERJ pelas bolsas concedidas. Esse trabalho foi parcialmente apoiado pela FAPERJ, números de concessão FAPERJ CNE E-26/203.954/2024 e E-26/010/00168/2015; CNPq 304243/2024-8. CNPq 157868/2025-7 (bolsa A.S.S.); CAPES (código de financiamento 001).

Referências Bibliográficas

- Forezi, L. da S. M.; da Silva, F. de C.; Ferreira, V. F.; *Aqui tem Química*, 1a. ed., Interciência: Rio de Janeiro, 2023.
- Ferreira, V. F.; da Silva, F. de C.; Forezi, L. da S. M.; *Aqui tem Química*, Vol. 2, e-Paper: Rio de Janeiro, 2024.
- Baekeland, L. H.; *US Patent 942 699*, **1907**.
- Baekeland, L. H.; *US Patent 942 809*, **1907**.
- Crespy, D.; Bozonnet, M.; Meier, M.; 100 Years of Bakelite, the Material of a 1000 Uses. *Angewandte Chemie International Edition* **2008**, *47*, 3322. [Crossref]
- Hirano, K.; Asami, M.; Phenolic resins-100 years of progress and their future. *Reactive and Functional Polymers* **2013**, *73*, 256. [Crossref]
- Thompson, R. C.; Olsen, Y.; Mitchell, R. P.; Davis, A.; Rowland, S. J.; John, A. W. G.; McGonigle, D.; Russell, A. E.; Lost at sea: where is all the plastic? *Science* **2004**, *304*, 838. [Crossref]
- Arthur, C.; Baker, J.; Bamford, H.; *Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris*. University of Washington Tacoma: Tacoma, 2008.
- Ferreira, P. G.; da Silva, F. C.; Ferreira, V. F.; A Importância da Química para a Economia Circular *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 452. [Crossref]
- Zhang, S.; Wang, J.; Yan, P.; Hao, X.; Xu, B.; Wang, W.; Aurangzeib, M.; Non-biodegradable microplastics in soils: a brief review and challenge. *Journal of Hazardous Materials* **2021**, *409*, 124525. [Crossref]
- Scheirs, J.; Em *Modern Styrenic Polymers: Polystyrenes and Styrenic Copolymers*; Scheirs, J.; Priddy, D. B.; eds.; John Wiley & Sons, Ltd: New Jersey, 2003, cap. 1.
- Blyth, J.; Hofmann, A. W.; Ueber das Stryol und einige seiner Zersetzungsproducte. *Justus Liebigs Annalen der Chemie* **1845**, *53*, 289. [Crossref]
- Rasmussen, S. C.; Revisiting the Early History of Synthetic Polymers: Critiques and New Insights, *Ambix* **2018**, *65*, 356. [Crossref]
- Kik, K.; Bukowska, B.; Sicińska, P.; Polystyrene nanoparticles: Sources, occurrence in the environment, distribution in tissues, accumulation and toxicity to various organisms. *Environmental Pollution* **2020**, *262*, 114297. [Crossref]
- Tuteja, J.; Vyas, A.; Sand, A.; Em *Polyethylene - New Developments and Applications*; Sand, A.; Tuteja, J.; eds.; IntechOpen Limited: London, 2024, cap. 1.
- Universidade do Havaí em Hilo. Disponível em: <<https://hilo.hawaii.edu/campuscenter/hohonu/volumes/documents/SyntheticSeasTheGreatPacificGarbagePatch.pdf>>. Acesso em: 10 abril 2025.
- UNEP. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/reportagem/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-poluicao-plastica?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 14 abril 2025.
- Houssini, K.; Li, J.; Tan, Q.; Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment* **2025**, *6*, 257. [Crossref]
- STATISTA. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>>. Acesso em: 14 abril 2025.
- Thushari, G. G. N.; Senevirathna, J. D. M.; Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon* **2020**, *6*, e04709. [Crossref]
- Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L.; Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Science Advances* **2017**, *3*, e1700782. [Crossref]
- Zimmermann, W.; Biocatalytic recycling of plastics: facts and fiction. *Chemical Science* **2025**, *16*, 6573. [Crossref]
- Lebreton, L.; Slat, B.; Ferrari, F.; Sainte-Rose, B.; Aitken, J.; Marthouse, R.; Hajbane, S.; Cunsolo, S.; Schwarz, A.; Levivier, A.; Noble, K.; Debeljak, P.; Maral, H.; Schoeneich-Argent, R.; Brambini, R.; Reisser, J.; Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific Reports* **2018**, *8*, 4666. [Crossref]
- Centro para Sistemas Sustentáveis. Disponível em: <<https://css.umich.edu/publications/research-publications/un-environmental-effects-assessment-panel-update-assessment-2023>>. Acesso em: 14 de abril de 2025.
- Centro para Sistemas Sustentáveis. Disponível em: <<https://css.umich.edu/publications/research-publications/un-environmental-effects-assessment-panel-update-assessment-2023>>. Acesso em: 14 abril 2025.
- Li, W.; Zu, B.; Yang, Q.; Guo, J.; Li, J.; Sources, distribution, and environmental effects of microplastics: a systematic review. *RSC Advances* **2023**, *13*, 15566. [Crossref]
- Osman, A. I.; Hosny, M.; Eltaweil, A. S.; Omar, S.; Elgarahy, A. M.; Farghali, M.; Yap, P.-S.; Wu, Y.-S.; Nagandran, S.; Batumalaie, K.; Gopinath, S. C. B.; John, O. D.; Sekar, M.; Saikia, T.; Karunanithi, P.; Hatta, M. H. M.; Akinyede, K. A.; Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: a review. *Environmental Chemistry Letters* **2023**, *21*, 2129. [Crossref]
- Shaghaleh, H.; Xu, X.; Wang, S.; Current progress in production of biopolymeric materials based on cellulose, cellulose nanofibers, and cellulose derivatives. *RSC Advances* **2018**, *8*, 825. [Crossref]
- Babu, R. P.; O'Connor, K.; Seeram, R.; Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in Biomaterials* **2013**, *2*, 1. [Crossref]
- Rosenboom, J. G.; Langer, R.; Traverso, G.; Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials* **2022**, *7*, 117. [Crossref]
- Hu, Y.; Daoud, W. A.; Cheuk, K. K. L.; Lin, C. S. K.; Newly Developed Techniques on Polycondensation, Ring-Opening Polymerization and Polymer Modification: Focus on Poly(Lactic Acid). *Materials* **2016**, *9*, 133. [Crossref]
- Kings Research. Disponível em: <<https://www.kingsresearch.com/pt/poly-lactic-acid-market-1310>>. Acesso em: 15 abril 2025.

33. Dakshinamoorthi, B. M.; Adaikalavan, U.; Chinnarasu, A.; Krishnan, N.; Jothiraman, S.; Polyhydroxybutyrate: A Sustainable Alternative for Synthetic Polymers. *Biosciences Biotechnology Research Asia* **2024**, *21*, 851. [Crossref]
34. Sharma, V.; Sehgal, R.; Gupta, R.; Polyhydroxyalkanoate (PHA): Properties and Modifications. *Polymer* **2021**, *212*, 123161. [Crossref]
35. Iftikhar, N.; Qudus, F.; Nadeem, N.; Ali, I.; Raza, M. U.; Zaid, M.; Production of Polyhydroxyalkanoates (pha) by bacillus and pseudomonas on Cheap Carbon Substrates. *Brazilian Archives of Biology and Technology* **2024**, *67*, e24230082. [Crossref]
36. Bakhtiari, S. S. E.; Karbasi, S.; Toloue, E. B.; Modified poly(3-hydroxybutyrate)-based scaffolds in tissue engineering applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules* **2021**, *166*, 986. [Crossref]
37. Pismane Consulting. Disponível em: <<https://prismaneconsulting.com/blog-details/poly-lactic-acid-market-size-growth-projections-key-drivers-and-major-challenges>>. Acesso em: 25 abril 2025.
38. Fortune Business. Disponível em: <<https://www.fortunebusinessinsights.com/polyhydroxyalkanoate-market-109847>>. Acesso em: 17 abril 2025.
39. Wang, J.; Huang, J.; Liu, S.; The production, recovery, and valorization of polyhydroxybutyrate (PHB) based on circular bioeconomy. *Biotechnology Advances* **2024**, *72*, 108340. [Crossref]
40. Sirohi, R.; Pandey, J. P.; Gaur, V. K.; Gnansounou, E.; Sindhu, R. Critical overview of biomass feedstocks as sustainable substrates for the production of polyhydroxybutyrate (PHB). *Bioresource Technology* **2020**, *311*, 123536. [Crossref]
41. Verified Market Research. Disponível: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/polyhydroxybutyrate-phb-market/?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 18 abril 2025.
42. Yeo, J. C. C.; Muiruri, J. K.; Thitsartarn, W.; Li, Z.; He, C.; Recent advances in the development of biodegradable PHB-based toughening materials: Approaches, advantages and applications. *Materials Science and Engineering: C* **2018**, *92*, 1092. [Crossref]
43. Avella, M.; Martuscelli, E.; Raimo, M.; Review properties of blends and composites based on poly(3-hydroxy)butyrate (PHB) and poly(3-hydroxybutyrate-hydroxyvalerate) (PHBV) copolymers. *Journal of Materials Science* **2000**, *35*, 523. [Crossref]
44. Market Research Future. Disponível em: <<https://www.marketresearchfuture.com/reports/polyhydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate-market-29510>>. Acesso em: 19 abril 2025.
45. Steiner, D.; Pascini, M. G.; Em *Chemical and Physical Peelings. Clinical Procedures*; Issa, M.; Tamura, B.; eds.; Springer: Cham, 2018, cap. 7.
46. Perricone, N. V.; DiNardo, J. C.; Photoprotective and Antiinflammatory Effects of Topical Glycolic Acid. *Dermatologic Surgery* **1996**, *22*, 435. [Crossref]
47. Sharad, J.; Glycolic acid peel therapy – a current review. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology* **2013**, *6*, 281. [Crossref]
48. Verified Market Research. Disponível em: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/glycolic-acid-market/?utm_source=googleads&utm_campaign=22395783489&utm_term=glycolic%20acid%20market&gad_source=1&gbraid=0AAAAAC5t6V_j7hgrzYQowQOQyz1ffh9Dw9&gclid=CjwKCAjwwqfABhBcEiwAZJjC3ovKqUJauCT5w5Tg74UtVF56RPbcDhr6f_0UuqLj0ZxVCJHeBoIHWBoCMvMQAvD_BwE>. Acesso em: 24 abril 2025.
49. Kataoka, M.; Sasaki, M.; Hidalgo, A.-R. G. D.; Nakano, M.; Shimizu, S.; Glycolic Acid Production Using Ethylene Glycol-Oxidizing Microorganisms. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* **2001**, *65*, 2265. [Crossref]
50. Raquez, J.-M.; Mincheva, R.; Coulembier, O.; Dubois, P.; 4.31 - Ring-Opening Polymerization of Cyclic Esters: Industrial Synthesis, Properties, Applications, and Perspectives. *Polymer Science: A Comprehensive Reference* **2012**, *4*, 761. [Crossref]
51. Wang, D.; Li, J.; Meng, W.; Wang, J.; Wang, K.; Zhou, H.; Yang, Y.; Fan, Z.; Fan, X.; Integrated Process for Producing Glycolic Acid from Carbon Dioxide Capture Coupling Green Hydrogen. *Processes* **2022**, *10*, 1610. [Crossref]
52. Balla, E.; Daniilidis, V.; Karlioti, G.; Kalamas, T.; Stefanidou, M.; Bikiaris, N. D.; Vlachopoulos, A.; Koumentakou, I.; Bikiaris, D. N.; Poly(lactic Acid): A Versatile Biobased Polymer for the Future with Multifunctional Properties—From Monomer Synthesis, Polymerization Techniques and Molecular Weight Increase to PLA Applications. *Polymers* **2021**, *13*, 1822. [Crossref]
53. Global Market Insights. Disponível em: <<https://www.gminsights.com/industry-analysis/lactic-acid-and-poly-lactic-acid-market>>. Acesso em: 20 fevereiro 2026.
54. Montané, X.; Montornes, J. M.; Nogalska, A.; Olkiewicz, M.; Giamberini, M.; Garcia-Valls, R.; Badia-Fabregat, M.; Jubany, I.; Tytkowski, B.; Synthesis and synthetic mechanism of Poly(lactic acid). *Physical Sciences Reviews* **2020**, *5*, 20190102. [Crossref]
55. Gautier, E.; Fuertes, P.; Cassagnau, P.; Pascault, J.-P.; Synthesis and Rheology of Biodegradable Poly(glycolic acid) Prepared by Melt Ring-Opening Polymerization of Glycolide. *Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry* **2009**, *47*, 1440. [Crossref]
56. Drumright, R. E.; Gruber, P. R.; Henton, D. E.; Poly(lactic acid) technology. *Advanced Materials* **2000**, *12*, 1841. [Crossref]
57. Milovanovic, S.; Lukic, I.; Horvat, G.; Novak, Z.; Frerich, S.; Petermann, M.; García-González, C. A.; Green Processing of Neat Poly(lactic acid) Using Carbon Dioxide under Elevated Pressure for Preparation of Advanced Materials: A Review (2012–2022). *Polymers* **2023**, *15*, 860. [Crossref]
58. Abe, M. M.; Martins, J. R.; Sanvezzo, P. B.; Macedo, J. V.; Branciforti, M. C.; Halley, P.; Botaro, V. R.; Brienzo, M.; Advantages and Disadvantages of Bioplastics Production from

- Starch and Lignocellulosic Components. *Polymers* **2021**, *13*, 2484. [[Crossref](#)]
59. Yang, Y.; Fu, J.; Duan, Q.; Xie, H.; Dong, X.; Yu, L.; Strategies and Methodologies for Improving Toughness of Starch Films. *Foods* **2024**, *13*, 4036. [[Crossref](#)]
60. Tharanathan, R. N.; Starch-value addition by modification. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **2005**, *45*, 371. [[Crossref](#)]
61. Bangar, S. P.; Whiteside, W. S.; Ashogbon, A. O.; Kumar, M.; Recent advances in thermoplastic starches for food packaging: A review. *Food Packaging and Shelf Life* **2021**, *30*, 100743. [[Crossref](#)]
62. Khan, B.; Niazi, M. B. K.; Samin, G.; Jahan, Z.; Thermoplastic Starch: A Possible Biodegradable Food Packaging Material-A Review. *Journal of Food Process Engineering* **2017**, *40*, e12447. [[Crossref](#)]
63. Chauhan, K.; Kaur, R.; Chauhan, I.; Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics. *Polymer-Plastics Technology and Materials* **2024**, *63*, 1. [[Crossref](#)]
64. Coherent Market Insights. Disponível em: <<https://www.coherentmarketinsights.com/market-insight/thermoplastic-starch-market-5389>>. Acesso em: 15 maio 2025.