

Polímeros recicláveis: impulsionando a economia circular sustentável

RESUMO

O aumento no consumo de materiais poliméricos e seus impactos ambientais têm incentivado estratégias de reciclagem alinhadas à economia circular. Este artigo analisa métodos de reciclagem de polímeros — mecânica, química, energética e biológica — abordando mecanismos, aplicações, limitações e sustentabilidade. Com base em estudos de 2015 a 2025, observa-se avanço em tecnologias como pirólise, manufatura aditiva e processamento hidrotérmico. Também são discutidas barreiras econômicas, sociais e regulatórias que afetam a viabilidade da reciclagem. Conclui-se que a integração entre tecnologia e políticas públicas é fundamental para ampliar a reciclagem, reduzir o uso de fontes fósseis e promover um modelo produtivo mais sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Plásticos. Impacto-ambiental. Sustentabilidade. Tecnologias-de-Reprocessamento. Gestão-de-Resíduos-Sólidos.

Everton Luiz de Paula

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri,
Diamantina, Minas Gerais, Brasil
everton.luiz@ufvjm.edu.br

Jordane Silva Rodrigues

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri,
Diamantina, Minas Gerais, Brasil
jordane.rodrigues@ufvjm.edu.br

Josy Kelly Lima Ribeiro

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri,
Diamantina, Minas Gerais, Brasil
josy.ribeiro@ufvjm.edu.br

William Oliveira Júnior

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri,
Diamantina, Minas Gerais Brasil
william.oliveira@ufvjm.edu.br

**Luiz Henrique Oliveira Corcino
Vieira**

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri,
Diamantina, Minas Gerais Brasil
luiz.corcino@ufvjm.edu.br

Nathália da Cunha Silva

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri,
Diamantina, Minas Gerais Brasil
nathalia.cunha@ufvjm.edu.br

INTRODUÇÃO

Os polímeros são macromoléculas compostas por cadeias de monômeros repetitivos e apresentam propriedades como leveza, durabilidade, resistência química e facilidade de processamento. Essas características os tornam amplamente utilizados em diferentes setores, como indústria automotiva, eletrônica, construção civil, agricultura, saúde e, principalmente, em embalagens (Ribeiro, 2024; Pitt, 2011; Feroldi, 2024). Eles podem ser classificados em naturais, como a celulose e proteínas, e sintéticos, como o polietileno e o nylon. Desde o início da chamada “era do plástico”, mais de 8 bilhões de toneladas de materiais poliméricos foram produzidas globalmente. No entanto, uma parcela significativa — mais de 60% — foi descartada de forma inadequada, acumulando-se em aterros ou no meio ambiente, gerando graves problemas ecológicos e desperdício de recursos (Geyer; Jambeck; Law, 2017; Zhang; Killian; Thevenon, 2024).

A resistência desses materiais à degradação natural, embora vantajosa em aplicações industriais, contribui para sua persistência no ambiente, afetando a fauna, a flora e a qualidade do solo e da água. Projeções indicam que a produção mundial de plásticos pode ultrapassar 1.340 milhões de toneladas métricas até 2050, impulsionada por padrões de consumo intensivo e crescimento populacional (Stegmann et al., 2022). Diante desse cenário, aumenta a pressão por soluções que reduzam os impactos ambientais, sendo a reciclagem uma das estratégias mais promissoras. Estudos têm destacado a importância de desenvolver polímeros mais sustentáveis e de ampliar as tecnologias voltadas à reutilização desses materiais (Spinacé; De Paoli, 2005).

A produção e o consumo de plástico cresceram significativamente nas últimas décadas, superando 400 milhões de toneladas em 2022. A previsão é de que a produção global chegue a quase 600 milhões de toneladas até 2050. A reciclagem de produtos poliméricos é essencial para o uso sustentável de materiais e para a transição verde. Assim, diversas iniciativas, políticas e regulamentações buscam diminuir os resíduos poliméricos e estabelecer uma base para a economia circular desses materiais (Bredács et al., 2025). Para aumentar a taxa de reciclagem de materiais poliméricos, é essencial coletar, classificar e reciclar mais produtos pós-consumo como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Etapas do processo de reciclagem



Fonte: Os autores (2025)

A reciclagem de polímeros possibilita reduzir o volume de resíduos sólidos, economizar energia, conservar recursos naturais e mitigar a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo diretamente para os princípios da economia circular (Luo et al., 2024). Existem diferentes abordagens de reciclagem — mecânica, química, energética e biológica —, cada uma com vantagens e limitações conforme o tipo e grau de contaminação do material (Kumar, 2024). Tecnologias avançadas, como pirólise, processamento hidrotérmico, solvólise, upcycling e métodos de produção de fibras (eletrofiação, fiação por sopro, fiação centrífuga), vêm sendo estudadas como alternativas mais eficazes e sustentáveis para a valorização de resíduos poliméricos (Majzoub; Al-Mohannadi, 2024; Chagas et al., 2024). A escolha da técnica mais adequada depende de fatores como escalabilidade, custo e compatibilidade com o tipo de polímero, sendo essencial para garantir o reaproveitamento eficiente e ambientalmente responsável desses materiais.

A coleta seletiva é essencial para a preservação ambiental, pois reduz a extração de recursos naturais e as emissões de gases de efeito estufa, ao permitir que materiais como plásticos e papel sejam reciclados em vez de descartados (Silva; Mello, 2024). Entre os resíduos sólidos urbanos, os plásticos se destacam pela abundância e pelo potencial poluidor. A separação e triagem desses materiais — etapa crucial da cadeia de reciclagem — garante que os polímeros sejam encaminhados corretamente às indústrias, onde serão reaproveitados em novos produtos, promovendo a economia circular (Accorsi, 2018).

Plásticos diferentes exigem processos específicos, e sua mistura pode comprometer a qualidade do produto reciclado. Por isso, a separação adequada, especialmente entre PET e HDPE, é fundamental para a eficácia da reciclagem (Yugue, 2020). Para isso, utilizam-se métodos manuais, baseados na identificação visual, e mecânicos, com esteiras, separadores magnéticos e fluxos de ar, que aumentam a eficiência da triagem (Ferro, 2024).

Após a triagem, a escolha do processo de reciclagem depende da composição química do polímero, nível de contaminação e finalidade do produto final. Dentre os métodos disponíveis, destacam-se a reciclagem mecânica — dividida em primária (resíduos limpos do próprio processo industrial) e secundária (resíduos

pós-consumo) — e as rotas química e energética (Ragaert; Delva; Van Geem, 2017). A reciclagem mecânica é amplamente usada para polímeros como PE, PP e PET, pois permite o reaproveitamento sem alterações significativas na estrutura química (Ignatyev; Thielemans; Vander Beke, 2014), contribuindo para a sustentabilidade e para a redução do impacto ambiental (Valerio; Muthuraj; Codou, 2020).

Figura 2: Ilustração do processo de reciclagem mecânica



Fonte: Os autores (2025)

Nesta forma de reciclagem geralmente são utilizadas as técnicas de extrusão, injeção, moldagem por compressão e termoformagem. Para que esse processo seja eficaz algumas etapas fundamentais precisam ser seguidas, incluindo: separação do material plástico, moagem, lavagem, secagem, processamento e conversão do polímero em um novo produto (Oladele et al., 2023). Dependendo da origem do resíduo polimérico e do tipo de material, além dos recursos financeiros e das tecnologias disponíveis nas unidades de processamento, as etapas podem variar.

A reciclagem mecânica desempenha um papel fundamental na transição para uma economia circular. No entanto, esse processo ainda enfrenta diversos desafios que limitam sua viabilidade econômica e ambiental. Entre os principais obstáculos estão o alto custo, a degradação das propriedades mecânicas dos materiais durante os ciclos de reprocessamento e a qualidade inconsistente dos produtos reciclados (Schyns; Shaver, 2021). Os polímeros submetidos à reciclagem mecânica tendem a apresentar deterioração de suas propriedades devido à degradação provocada por fatores como calor, cisalhamento mecânico e oxidação. Essa degradação compromete a integridade da estrutura molecular, resultando na perda de desempenho mecânico do material. Como consequência, a qualidade do material reciclado torna-se uma das principais limitações dessa técnica. Além disso, as propriedades reológicas dos polímeros também são afetadas, o que influencia diretamente sua processabilidade e deve ser cuidadosamente considerado nas etapas subsequentes de reaproveitamento (Oblak et al., 2015).

Na reciclagem química ou reciclagem terciária, ocorre a dissolução ou despolimerização dos polímeros por meio do uso de temperatura, pressão, solventes, reagentes ou uma combinação destes, que resulta em mudança na estrutura química, conforme mostra a Figura 3. Nesse processo o produto resultante pode ser um polímero purificado em solução, um oligômero, um monômero ou matéria-prima bruta na forma gasosa ou líquida (Ignatyev; Thielemans; Vander Beke, 2014). O oligômero ou monômero resultante é geralmente aplicado como base para a criação de novos produtos (Grigore, 2017).

A reciclagem química requer uma grande quantidade de produtos químicos e ainda não é possível reciclar todos os tipos de polímeros. Os métodos de reação química usados atualmente para esse processo de reciclagem incluem o seguinte: hidrogenação, glicólise, gaseificação, hidrólise, pirólise, metanólise, alcoólise,

aminólise, despolimerização química, craqueamento térmico, craqueamento e reforma catalítica, fotodegradação, degradação do ultrassom, degradação em um reator de micro-ondas (Oladele et al., 2023).

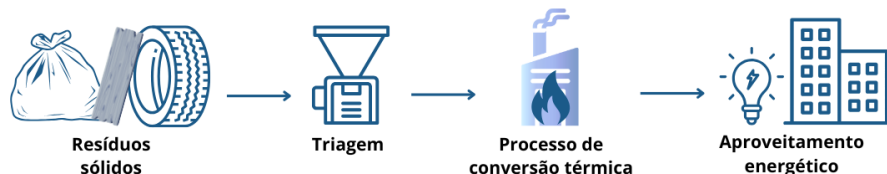
Figura 3: Ilustração do processo de reciclagem química



Fonte: Autores (2025)

Além da reciclagem química, outro método importante é a recuperação energética, também denominada reciclagem quaternária, que consiste na conversão de resíduos poliméricos em energia térmica, elétrica ou mecânica por meio de processos de combustão controlada. Esse tipo de reciclagem é importante para resíduos que não podem ser reciclados de forma mecânica ou química devido à sua complexidade ou elevado grau de contaminação (Al-Salem, Lettieri, Baeyens, 2009).

Figura 4: Ilustração do processo de reciclagem energética



Fonte: Os autores (2025)

Os materiais poliméricos possuem um alto poder calorífico, comparável ou até superior ao de alguns derivados do petróleo, o que os torna fontes energéticas eficientes quando submetidos à incineração com recuperação de energia. Embora não promova a circularidade dos materiais, essa técnica contribui para a redução do volume de resíduos e para o aproveitamento energético de recursos que, de outra forma, seriam descartados (Ragaert; Delva; Van Geem, 2017).

Apesar de ser a maneira mais eficaz de reduzir o volume de material e promover a produção de energia na forma de calor, vapor e eletricidade, substâncias perigosas podem ser liberadas na atmosfera durante o processamento. Um exemplo é o PVC e aditivos halogenados que estão na maioria das vezes presentes em resíduos plásticos mistos, levando à produção de dioxinas, outros bifenilos policlorados e furanos que são liberados no meio ambiente (El Mehdi et al., 2017).

Além dos métodos de reciclagem mecânica, química e energética, existem alternativas de reaproveitamento de resíduos plásticos que ampliam as possibilidades de valorização desses materiais e colaboram significativamente para

a redução dos impactos ambientais. Muitas técnicas de reciclagem ainda estão em evolução, exigindo tecnologia e *expertise* avançadas, e podem ainda não garantir taxas de reciclagem adequadas para atender às demandas econômicas por sua sustentabilidade. Nesse contexto, práticas como a reciclagem biológica, o reaproveitamento em aplicações de menor valor agregado e a utilização de resíduos como carga em compósitos surgem como alternativas importantes, embora ainda enfrentem limitações técnicas, econômicas e regulatórias.

A transformação de materiais poliméricos reciclados traz diversas vantagens, tanto ambientais quanto econômicas. Uma das principais vantagens é a redução do impacto ambiental. Ao reciclar plásticos, diminui-se a quantidade de resíduos sólidos enviados para aterros sanitários e, consequentemente, reduz-se a poluição associada à decomposição desses materiais. Além disso, a reciclagem ajuda a conservar recursos naturais, pois diminui a necessidade de extração de petróleo, que é a matéria-prima para a produção de plásticos virgens (Fernandes, 2009).

Outra vantagem significativa é a economia de energia. O processo de reciclagem de plásticos geralmente consome menos energia em comparação com a produção de novos plásticos a partir de matérias-primas virgens. Por exemplo, a reciclagem de PET (polietileno tereftalato) pode economizar até 70% de energia em relação à produção do material novo. Isso se traduz em uma diminuição das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Silva, 2017).

A transformação de materiais poliméricos reciclados em novos produtos é uma prática crescente e inovadora em várias indústrias (Real, 2021). Aqui estão alguns exemplos específicos de como diferentes tipos de plásticos reciclados são transformados em novos materiais poliméricos:

Tabela 1: Transformação de materiais poliméricos em novos materiais.

Tipo de Plástico	Transformação	Novo Material
PET (Polietileno Tereftalato)	Garrafas PET recicladas são trituradas e processadas em pellets.	Garrafas, fibras têxteis (roupas e carpetes) e embalagens.
HDPE (Polietileno de Alta Densidade)	Reciclagem de recipientes plásticos, como frascos de detergente e produtos de limpeza.	Recipientes, tubos e materiais de construção (painéis, telhas).
PP (Polipropileno)	Reciclagem de embalagens de alimentos e produtos de consumo.	Recipientes, componentes automotivos e produtos de uso diário.
PS (Poliestireno)	Reciclagem de copos descartáveis e embalagens de alimentos.	Copos, pratos e componentes de eletrônicos.
PVC (Policloreto de Vinila)	Reciclagem de tubos e embalagens de PVC.	Tubos, revestimentos de pisos e produtos de construção.

Misturas de Plásticos	Plásticos mistos, que não podem ser reciclados de forma convencional, são processados em novos compostos plásticos.	Compostos utilizados em mobiliário urbano, pavimentação e produtos de construção.
Fibras Têxteis	Plásticos reciclados, como PET, são transformados em fibras têxteis.	Fabricação de roupas, tapetes e outros produtos têxteis.

Fonte: REAL, 2021.

As transformações dos materiais poliméricos reciclados estão sendo aplicadas em diversos setores. Um exemplo notável é a indústria de embalagens, onde plásticos reciclados são usados para fabricar garrafas, sacolas e outros tipos de embalagens. Empresas como a Coca-Cola e a Unilever têm investido em iniciativas de sustentabilidade, utilizando plásticos reciclados em suas embalagens, promovendo a economia circular (Prado, 2023).

Outro setor em crescimento é o da construção civil. Materiais plásticos reciclados estão sendo incorporados em produtos como telhas, pisos e painéis. Por exemplo, a empresa brasileira Plástico Verde produz telhas a partir de plásticos reciclados, oferecendo uma alternativa sustentável e leve em comparação com materiais convencionais (Oliveira, 2009).

Na indústria automotiva, a transformação de plásticos reciclados também está ganhando destaque. Montadoras como a Ford têm utilizado plásticos reciclados em componentes de veículos, como painéis internos e isolamento acústico. Isso não só reduz o peso dos veículos, melhorando a eficiência de combustível, mas também diminui o uso de materiais novos (Santos, 2012).

Além disso, a indústria de moda e têxtil têm explorado a reciclagem de plásticos na produção de tecidos. Marcas como a Patagônia e a Adidas utilizam plásticos reciclados, como garrafas PET, para fabricar roupas e calçados. Essa abordagem não apenas reduz o desperdício, mas também oferece aos consumidores opções sustentáveis (Melo, 2009).

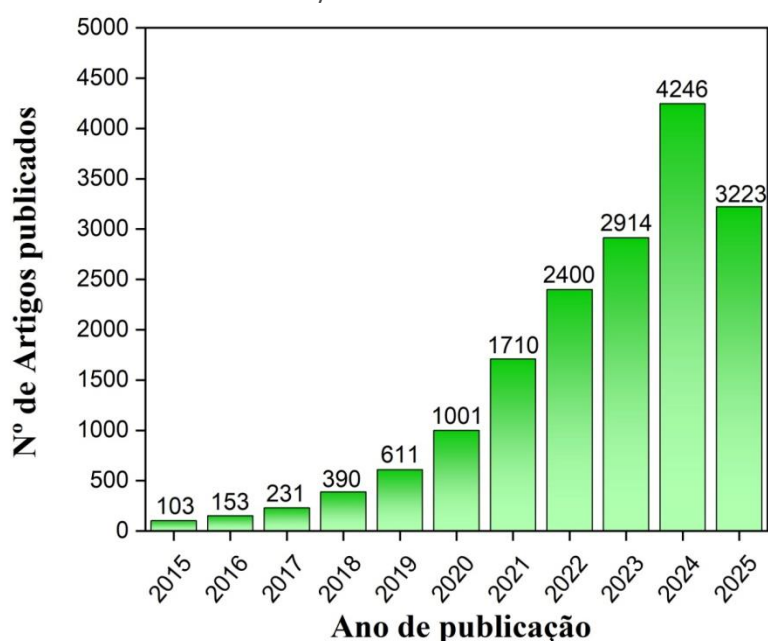
Entretanto, a aceitação de produtos feitos de plásticos reciclados ainda enfrenta desafios. A percepção do consumidor sobre a qualidade e segurança desses produtos pode influenciar sua adoção no mercado. Para superar essa barreira, é fundamental investir em pesquisa e desenvolvimento, além de campanhas educativas que demonstrem os benefícios e a viabilidade dos plásticos reciclados. A transparência nas práticas de reciclagem e a certificação de qualidade também são essenciais para ganhar a confiança do consumidor (Ramos, 2001).

Nesse foco, o objetivo deste artigo de revisão é analisar e discutir o desenvolvimento e a aplicação de polímeros recicláveis no contexto da economia circular sustentável, destacando suas propriedades, métodos de reciclagem, impactos ambientais e potenciais contribuições para a redução do desperdício plástico. Além disso, o artigo visa identificar as barreiras e oportunidades para a implementação desses materiais em diferentes setores, promovendo uma transição eficaz para práticas mais sustentáveis.

METODOLOGIA

Estudos foram identificados por meio de busca eletrônica na base de dados Science Direct para o levantamento de informações de estudos de reciclagem de materiais poliméricos, tendo em vista técnicas químicas e mecânicas para reciclagem de polímeros e o desenvolvimento de polímeros que facilitem o processo de reciclagem, relacionados à economia circular. Com a finalidade de delimitar o campo de investigação, optou-se por artigos publicados entre os anos de 2015 a 2025, em inglês. Os descritores de assuntos foram Polymer Recycling e Circular Economy, avaliando o número de artigos para a combinação. A pesquisa foi realizada em inglês, desta forma o conector “+” foi utilizado nas probabilidades que a combinação dos descritores permitia. Foi observado um crescimento nos resultados pelo tema, com uma crescente exponencial nos últimos anos, indicando um aumento no interesse e desenvolvimento no tema.

Figura 6: Publicações na última década contendo as palavras chave Polymer Recycling e Circular Economy na base de dados Science Direct



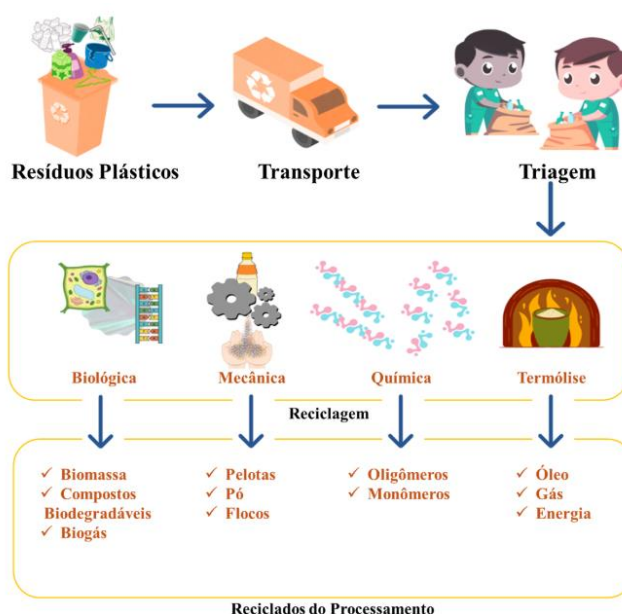
Fonte: Os autores (2025).

Após análise manual foram identificados os artigos de revisão que não faziam parte dos filtros adicionados e que, por algum motivo, foram considerados pela ferramenta de busca do Science Direct. Por fim, foram avaliados 72 trabalhos que se enquadraram nos critérios de busca. Os artigos selecionados foram submetidos à análise qualitativa.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pode ser visto na Figura 7, o processo de reciclagem desde a coleta de resíduos poliméricos até o produto base do processamento, que posteriormente é utilizado para fabricação dos produtos finais (Grigore, 2017). Os métodos utilizados no processamento dependem da composição polimérica, gerando diferentes produtos.

Figura 7: Visão geral do processo de reciclagem com diferentes métodos de processamento, utilizando as referências (Grigore, 2017) e (Klauer, 2024).



Fonte: Os autores (2025).

Pirólise

A pirólise é um processo de reciclagem química que decompõe termicamente os polímeros na ausência de oxigênio, convertendo-os em produtos valiosos, como monômeros, óleos e gases. Esse método é particularmente útil para polímeros que são difíceis de reciclar mecanicamente, oferecendo uma alternativa sustentável para gerenciar resíduos plásticos e contribuindo para uma economia circular.

A pirólise de resíduos poliméricos apresenta benefícios ambientais e econômicos substanciais em comparação com as rotas convencionais de recuperação energética e disposição em aterro (Jeswani et al., 2021). Em termos de emissões de CO₂, estudos de avaliação do ciclo de vida (LCA) mostram que a pirólise pode reduzir as emissões em mais de 80 % em relação à incineração, ao passo que, de maneira geral, o impacto no aquecimento global e o consumo energético durante o ciclo de vida de um sistema baseado em pirólise são cerca de 50 % menores do que nas opções tradicionais de recuperação de energia (Jeswani et al., 2021; Schwarz et al., 2021).

Além da mitigação de gases de efeito estufa, a pirólise contribui para a conservação de recursos por meio da recuperação de monômeros e frações químicas de alto valor, como fenol e bisfenol-A, que podem ser reintroduzidos na síntese de novos polímeros, reduzindo a demanda por matérias-primas fósseis virgens (Schelte; Hendrickx; Severengiz, 2023; Rathsack et al., 2025). Em particular, a capacidade de tratar fluxos mistos de resíduos plásticos — incomodidade para processos mecânicos — confere à pirólise maior flexibilidade operacional e elimina a necessidade de separação prévia complexa, convertendo resíduos em insumos para geração de energia ou como intermediários químicos para biorrefinarias (Setiabudi et al., 2020; Akgül et al., 2022).

Manufatura Aditiva (Impressão 3D)

A reciclagem de polímeros usando métodos de manufatura aditiva (AM) é uma abordagem inovadora que integra processos de reciclagem com tecnologias de impressão 3D para melhorar a sustentabilidade e a eficiência de recursos. Esse método envolve a conversão de polímeros residuais em materiais utilizáveis para impressão 3D, promovendo assim uma economia circular e reduzindo o impacto ambiental (Olawumi et al., 2023). Inicialmente, os resíduos poliméricos são coletados, separados por tipo, triturados até atingirem granulometria adequada e, em seguida, extrudados para a confecção de filamentos de diâmetro controlado. Esses filamentos são empregados em processos de deposição por extrusão (FDM/FFF), permitindo não apenas a produção de geometrias complexas e personalizadas, mas também a valorização de material reciclado, cujo custo de matéria-prima é significativamente inferior ao dos polímeros virgens (Feng; Wang; Wei, 2019; Olawumi; Oladapo; Olugbade, 2024; Wolf; Gerold; Möhring, 2024).

Do ponto de vista ambiental, essa abordagem reduz substancialmente as emissões de CO₂ e o consumo de energia quando comparada aos métodos tradicionais de fabricação e à produção de polímero virgem, uma vez que minimiza a demanda por recursos fósseis e a geração de rejeitos sólidos (Ribul et al., 2021; Olawumi; Oladapo; Olugbade, 2024). Economicamente, a utilização de filamentos reciclados oferece potencial de redução de custos operacionais, embora ainda seja necessário superar desafios relacionados à consistência das propriedades físico-mecânicas e à compatibilidade do material com os parâmetros de impressão (temperatura de extrusão, velocidade de deposição, retração) (Möllnitz et al., 2021; Olawumi; Oladapo; Olugbade, 2024).

Os polímeros mais empregados nessa rota são o ácido polilático (PLA), o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o polietileno tereftalato glicol (PETG). O PLA destaca-se por sua biodegradabilidade e maior facilidade de reciclagem mecânica, apesar de sua menor estabilidade térmica; o ABS reciclado já é aplicado em componentes estruturais e artigos esportivos, e o PETG demonstra ótimo equilíbrio entre resistência química e ductilidade (Rathsack et al., 2025; Romani et al., 2025; Vidakis et al., 2025). As poliamidas recicladas, por sua vez, vêm ganhando espaço em aplicações automotivas e têxteis devido à sua alta resistência mecânica e tenacidade (Feng; Wang; Wei, 2019; Sherwood, 2020).

Processamento Hidrotérmico

O processamento hidrotérmico de resíduos poliméricos consiste em uma tecnologia termoquímica que utiliza água sob condições subcríticas (temperaturas entre 180 °C e 360 °C, sob pressão suficiente para mantê-la no estado líquido) para provocar a degradação controlada das cadeias poliméricas em monômeros e outras espécies químicas de valor agregado (Abubakar et al., 2024). Durante a reação, a água atua simultaneamente como solvente e reagente, promovendo clivagens por hidrólise de ligações C–C e C–O, e permitindo a produção de frações sólidas, líquidas (álcool, cetonas, ácidos) ou gasosas (hidrocarbonetos leves), conforme ajustado pelos parâmetros de temperatura, pressão e tempo de residência (Abubakar et al., 2024; Čolnik; Irgolič; Škerget, 2025).

Uma das principais vantagens desse método é sua seletividade: ao contrário da pirólise convencional, que requer temperaturas superiores a 500 °C e resulta em produtos geralmente mistos e de qualidade variável, o processamento hidrotérmico pode gerar monômeros de interesse industrial — por exemplo, olefinas leves (propeno, butenos) a partir de polipropileno — com rendimentos significativamente maiores e menor consumo energético, já que pode utilizar de temperaturas entre 180-360°C e pressões de menos de 50bar para operação (Akgül et al., 2022; Abubakar et al., 2024). Além disso, a operação em condições menos severas reduz a formação de subprodutos carbonáceos indesejáveis e facilita a implementação de circuitos de recuperação de calor, reforçando seu perfil de sustentabilidade dentro de uma economia circular (Abubakar et al., 2024). O polipropileno (PP) destaca-se como um dos candidatos mais promissores ao processamento hidrotérmico. Estudos demonstraram que, na presença de catalisadores sólidos como carbonatos de potássio (K_2CO_3) e zeólita HZSM-5, o PP pode ser convertido em olefinas de cadeia curta com rendimentos superiores a 65 % em base de carbono, além de produzir fracionamentos leves utilizáveis como matérias-primas petroquímicas (Abubakar et al., 2024).

Por utilizar água em condições subcríticas para despolimerizar resíduos plásticos em monômeros e outros compostos de valor agregado, a reciclagem hidrotérmica apresenta vantagens ambientais e econômicas promissoras. Do ponto de vista ambiental, esse método reduz significativamente o volume de resíduos enviados a aterros ao converter, por exemplo, PLA e polipropileno em ácido láctico e olefinas leves, respectivamente, minimizando a poluição plástica global (Čolnik; Irgolič; Škerget, 2025). Além disso, operando em temperaturas mais baixas (180–360 °C) e sob pressão que mantém a água na fase líquida, o processo consome menos energia do que rotas termoquímicas convencionais como a pirólise, resultando em emissões de CO_2 inferiores e em uma pegada de carbono reduzida (Jeswani et al., 2021; Abubakar et al., 2024). Os subprodutos de alto valor — ácido láctico recuperado do PLA e olefinas de cadeia curta do polipropileno — podem ser reintroduzidos na cadeia produtiva de polímeros, fechando o ciclo e reduzindo a dependência de matérias-primas fósseis virgens (Da Silva Almeida et al., 2024; Čolnik; Irgolič; Škerget, 2025; Najmi et al., 2025).

Glicólise

A reciclagem de polímeros por glicólise consiste na despolimerização controlada de cadeias poliméricas mediante reação com glicóis de baixa massa molar, tais como etilenoglicol e propilenoglicol, sob a ação de catalisadores básicos, amínicos ou organometálicos. Nesse processo, as ligações éster ou uréia dos polímeros são rompidas, gerando monômeros ou oligômeros solúveis que podem ser subsequentemente purificados e repolimerizados, promovendo um ciclo fechado de produção (Najmi et al., 2025; Schwarz et al., 2021). Uma das principais vantagens dessa técnica é sua versatilidade: variando-se o tipo de glicol, a concentração catalítica, a temperatura e o tempo de reação, é possível otimizar o rendimento e a pureza dos produtos de glicólise para diferentes matrizes poliméricas (Kurańska et al., 2024; Najmi et al., 2025).

A implantação de instalações de glicólise em larga escala apresenta elevado potencial de benefícios ambientais e econômicos, especialmente na reciclagem de polímeros como o tereftalato de polietileno (PET). Do ponto de vista ambiental, a glicólise com propilenoglicol (PG) exibe um potencial de aquecimento global (GWP) de apenas 4,3 kg CO₂-eq/kg de PET reciclado, frente aos 91,3 kg CO₂-eq/kg observados na glicólise com etilenoglicol (EG) (Iturrondobeitia; Alonso; Lizundia, 2023). Essa drástica redução de emissões deriva da menor demanda energética e do aproveitamento direto dos monômeros recuperados, que substituem a produção de resina virgem e, conseqüentemente, diminuem a pegada de carbono associada à extração de matérias-primas fósseis. Além disso, a glicólise permite a recuperação de monômeros de alta pureza, que podem ser retransformados em novos polímeros com propriedades equivalentes aos originais, promovendo a conservação de recursos naturais e minimizando o consumo de energia em comparação à síntese convencional (Iturrondobeitia; Alonso; Lizundia, 2023; Rickert; Cerdas; Herrmann, 2020).

Estudos de análise de ciclo de vida demonstram que os processos de glicólise-PG demandam menos energia do que a fabricação de PET virgem e contribuem para a consolidação de cadeias produtivas de circuito fechado, característica essencial de uma economia verdadeiramente circular. No âmbito econômico, a adoção de plantas de glicólise de grande porte viabiliza economias de escala significativas. A substituição parcial de resina PET virgem por PET reciclado de alta qualidade pode gerar reduções de custos de matéria-prima superiores a 40% em aplicações industriais (Dollischek et al., 2024; Rickert; Cerdas; Herrmann, 2020). Ademais, o reaproveitamento de monômeros e subprodutos químicos de valor agregado aumenta as fontes de receita e melhora a competitividade do processo frente a outras rotas de reciclagem.

Dissolução e Precipitação

A reciclagem de polímeros por dissolução e precipitação constitui uma técnica de reciclagem química capaz de remover contaminantes e restaurar as propriedades originais do material reciclado. No seu cerne, este método baseia-se na dissolução seletiva do polímero em um solvente compatível — cuja afinidade é avaliada por meio dos Parâmetros de Solubilidade de Hansen (HSP) — seguida de precipitação controlada para recuperação do polímero em forma purificada (Ordonselli; Kwok; Meng, 2023). A extração de solvente desempenha papel crítico,

determinando tanto o rendimento de recuperação quanto o grau de remoção de aditivos, pigmentos e cargas indesejáveis. O processo não altera significativamente o comportamento de decomposição térmica dos polímeros, garantindo que o material reciclado retenha suas propriedades originais e permitindo sua reutilização em aplicações de alto valor (Ordonselli; Kwok; Meng, 2023; Sherwood, 2020).

Em termos de perspectivas, o processo de dissolução e precipitação apresenta-se como solução promissora para fluxos de resíduos poliméricos complexos, sobretudo aqueles provenientes de eletrônicos e compósitos, em que a contaminação por metais, pigmentos ou retardantes de chama inviabiliza a reciclagem mecânica convencional. Pesquisas futuras com foco na ampliação do leque de polímeros recicláveis, no desenvolvimento e na aplicação de solventes de base biológica e na implantação de estratégias de recuperação e reciclagem dos próprios solventes, com vistas à minimização do impacto ambiental e à conformidade com os princípios da química verde têm grande potencial nesta área (Dollischek et al., 2024; Rickert; Cerdas; Herrmann, 2020).

A implementação de instalações de dissolução e precipitação em escala industrial oferece ganhos ambientais e econômicos substanciais, sobretudo para polímeros complexos como o acrilonitrila butadieno estireno (ABS). Nesses sistemas, o ABS residual é dissolvido em solventes selecionados — geralmente acetato de etila ou metanol — e, em seguida, precipitado por adição de solventes coletores como etilenoglicol ou água, removendo eficazmente contaminantes como pigmentos de negro de fumo e aditivos. Ao restaurar as propriedades mecânicas e térmicas do polímero, essa técnica diminui o volume de resíduos destinados a aterros e amplia a reciclabilidade de materiais que, de outra forma, exigiriam descarte especial, mitigando a crise global de resíduos plásticos (Ordonselli; Kwok; Meng, 2023).

Aminólise e Metanólise

A aminólise e a metanólise constituem rotas químicas avançadas para a reciclagem de poliésteres, permitindo a despolimerização de tereftalato de polietileno (PET) e polietilenofuranoato (PEF) em monômeros de alta pureza e em intermediários químicos de valor agregado (Kasmi; Bäckström; Hakkarainen, 2023). Na aminólise, aminas de baixa massa molar as ligações éster do PET em condições relativamente brandas, frequentemente assistidas por aquecimento por micro-ondas, gerando diamidas tereftálicas e blocos aromáticos com grupamentos amina primários. Esses compostos podem então ser repolimerizados em poliiminas de excelente estabilidade térmica e reciclabilidade, suportando tanto esquemas de circuito aberto — nos quais os intermediários servem como plastificantes, adesivos ou precursores de poliuretanos biodegradáveis — quanto esquemas fechados, que permitem a despolimerização reversível das poliiminas, efetivamente fechando o ciclo de vida do polímero (Akgül et al., 2022; Kasmi; Bäckström; Hakkarainen, 2023).

Por sua vez, a metanólise promove a transesterificação simultânea de PET ou PEF em dimetil tereftalato (DMT) e dimetil furanoato (DMF), respectivamente, com rendimentos superiores a 90 % quando catalisada por ácidos sólidos ou assistida por micro-ondas. Os monômeros recuperados apresentam pureza

comparável à dos equivalentes virgens, viabilizando a síntese de PET ou PEF “*virgin-like*” em sistemas de circuito fechado, mesmo a partir de resíduos multicamadas e mistos que desafiam as rotas mecânicas convencionais (Xiong et al., 2020; Najmi et al., 2025).

Ambas as técnicas destacam-se pela elevada seletividade química e pela capacidade de operar sobre correntes contaminadas e heterogêneas, fatores que, combinados com ajustes finos em catalisadores e condições reacionais (temperatura, pressão e proporção reagente/polímero), favorecem a obtenção de polímeros reciclados com propriedades mecânicas e térmicas comparáveis ou superiores às do material original (Jeswani et al., 2021; Kasmi; Bäckström; Hakkarainen, 2023). Ainda que a versatilidade e o potencial de circularidade dessas rotas sejam claros — reduzindo a dependência de insumos fósseis, minimizando resíduos enviados a aterros e possibilitando tanto a produção de monômeros quanto de intermediários químicos —, a sua implantação em escala industrial demanda resolver desafios cruciais. Entre esses, destacam-se a recuperação e recirculação eficiente de reagentes (aminas e metanol), o desenvolvimento de catalisadores de alta vida útil e seletividade, bem como a integração destes processos aos sistemas de gestão de resíduos e às infraestruturas de reciclagem já existentes (Najmi et al., 2025; Valsange et al., 2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo desta revisão, examinamos um amplo espectro de técnicas de reciclagem de polímeros, desde rotas mecânicas (moldagem por injeção, extrusão, termoformagem) até processos químicos avançados (pirólise, processamento hidrotérmico, glicólise, dissolução-precipitação, aminólise e metanólise) e sua integração com manufatura aditiva. Cada uma dessas abordagens apresenta, em maior ou menor grau, potencial para mitigar o impacto ambiental dos resíduos plásticos e promover uma economia circular, mas também esbarra em limitações técnicas, energéticas e econômicas que ainda demandam soluções de P&D e ajustes operacionais.

Em nível ambiental, métodos termoquímicos como a pirólise e o processamento hidrotérmico destacaram-se pela capacidade de tratar fluxos heterogêneos e resíduos contaminados, gerando frações gasosas, líquidas ou monoméricas com redução de até 80 % nas emissões de CO₂ em comparação com a incineração, embora sua alta demanda energética e a necessidade de purificação de subprodutos imponham desafios de sustentabilidade e custo. Rotas de solvólise, incluindo glicólise e aminólise, alcançaram recuperação monomérica acima de 90 % para PET, PEF e PUR, conferindo pureza e propriedades mecânicas próximas às do material virgem, ao passo que a dissolução-precipitação mostrou-se eficiente na remoção de contaminantes críticos — pigmentos, cargas e retardantes de chama, restaurando o desempenho de ABS e outros termoplásticos.

Sob a ótica econômica, a produção de monômeros reciclados de alto valor (BHET, DMT, diamidas tereftálicas) pode reduzir custos de matéria-prima em até 40 %, além de abrir novos mercados para intermediários químicos de alto desempenho. A manufatura aditiva, por sua vez, beneficia-se da reutilização de

filamentos reciclados, diminuindo despesas e fomentando a personalização de componentes sem quebras significativas de qualidade.

Não obstante, a viabilidade em escala industrial requer avanços em quatro direções complementares:

i) Otimização energética e integração com fontes renováveis para processos térmicos e hidrotérmicos;

ii) Desenvolvimento de catalisadores e aditivos compatibilizantes que elevem rendimento, seletividade e vida útil operacional em solvólises e transesterificações;

iii) Implantação de sistemas de triagem avançada, hiperespectral, fluorescência, sensoriamento em linha para assegurar uniformidade e pureza das correntes de entrada;

iv) Avaliação holística por meio de análises de ciclo de vida (LCA) e estudos techno-econômicos (TEA) para quantificar benefícios de GWP, consumo energético e custo total de propriedade em operações contínuas.

Em síntese, nenhuma rota isolada oferecerá a solução definitiva para o desafio global dos resíduos plásticos. A sinergia entre métodos mecânicos e químicos, aliada à digitalização do processo de triagem e à adoção de práticas de design para circularidade, constituirá o arcabouço tecnológico necessário para transformar resíduos poliméricos em recursos estratégicos. O avanço conjunto dessas estratégias, suportado por políticas de incentivo e parcerias público-privadas, poderá consolidar uma economia verdadeiramente circular, na qual o fim de vida dos polímeros se converte em ponto de partida para novos ciclos de produção de alto valor agregado.

Recyclable polymers: driving the sustainable circular economy

ABSTRACT

The increasing consumption of polymeric materials and their environmental impacts have encouraged recycling strategies aligned with the circular economy. This article analyzes polymer recycling methods — mechanical, chemical, energy recovery, and biological — addressing mechanisms, applications, limitations, and sustainability. Based on studies from 2015 to 2025, advances are observed in technologies such as pyrolysis, additive manufacturing, and hydrothermal processing. Economic, social, and regulatory barriers affecting the feasibility of recycling are also discussed. It is concluded that the integration of technology and public policy is essential to expand recycling, reduce the use of fossil resources, and promote a more sustainable production model.

KEYWORDS: Plastics. Environmental impact. Sustainability. Reprocessing technologies. Solid waste management.

REFERÊNCIAS

- ABUBAKAR, F.; ALFAYEZ, I.; SULEYMANOV, H.; MCGREGOR, J. Catalytic hydrothermal conversion of polypropylene. *Catalysis Today*, [S. l.], v. 439, p. 114807, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114807>.
- ACCORSI, R. J. M. Avaliação de sustentabilidade em cooperativas de reciclagem de Porto Alegre/RS. 2018.
- AKGÜL, A. et al. Characterization of tars from recycling of PHA bioplastic and synthetic plastics using fast pyrolysis. *Journal of Hazardous Materials*, [S. l.], v. 439, p. 129696, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129696>.
- AL-SALEM, S. M.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, v. 29, n. 10, p. 2625-2643, 2009.
- BREDÁCS, M. et al. Progress towards composition-based inline sorting and recycling of multilayer polymer packaging. *Sustainable Materials and Technologies*, [Austria], v. 44, 2025.
- CHAGAS, P. A. M. et al. From waste to innovation: advancing the circular economy with nanofibers using recycled polymers and natural polymers from renewable or waste residues. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, [S. l.], v. 115, p. 1–15, dez. 2024. DOI: [10.1016/j.jiec.2024.12.053](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.12.053).
- ČOLNIK, M.; IRGOLIČ, M.; ŠKERGET, M. Hydrothermal decomposition of virgin and waste polylactic acid with subcritical water under N₂ and air atmospheres. *Polymer Testing*, [S. l.], v. 146, p. 108783, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2025.108783>.
- DA SILVA ALMEIDA, S. et al. Post-consumer high-density polyethylene matrix reinforced by sugarcane bagasse fibers treated in stearic acid solution. *Journal of Materials Research and Technology*, [S. l.], v. 31, p. 3749–3759, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.07.061>.
- DOLLISCHEK, L. B. et al. Injection molding of post-industrial recycled glass fiber reinforced polyphenylene sulfide (PPS GF40): industrial feasibility and material analysis. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 471, p. 143416, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143416>.
- EL MEHDI, M. et al. Recent advances in polymer recycling: a short review. *Current Organic Synthesis*, v. 14, n. 2, p. 171–185, 2017.
- FENG, L.; WANG, Y.; WEI, Q. PA12 powder recycled from SLS for FDM. *Polymers*, [S. l.], v. 11, n. 4, p. 727, 2019. DOI: [10.3390/POLYM11040727](https://doi.org/10.3390/POLYM11040727).
- FENGLI, L. et al. Recycling PA12 powder from selective laser sintering through producing filament for fused deposition modelling. *Polymers*, v. 11, n. 5, p. 801, 2019.

FERNANDES, F. A. N. Gestão e caracterização dos resíduos sólidos da LUBNOR/PETROBRAS: estudo de caso. 2009.

FERRO, B. R.; SOUZA, R. G. Gargalos de desempenho em centro de triagem da coleta seletiva. *Ambiente & Sociedade*, v. 27, p. e00064, 2024.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, [USA], v. 3, n. 7, p. e1700782, 7 jul. 2017.

GRIGORE, M. E. Methods of recycling, properties and applications of recycled thermoplastic polymers. *Recycling*, v. 2, n. 4, p. 24, 2017.

IGNATYEV, I. A.; THIELEMANS, W.; VANDER BEKE, B. Recycling of polymers: a review. *ChemSusChem*, v. 7, n. 6, p. 1579–1593, 2014.

ITURRONDOBEITIA, M.; ALONSO, L.; LIZUNDIA, E. Prospective life cycle assessment of poly(ethylene terephthalate) upcycling via chemoselective depolymerization. *Resources, Conservation and Recycling*, [S. l.], v. 198, p. 107182, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107182>.

JESWANI, H. et al. Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery. *Science of the Total Environment*, [S. l.], v. 769, p. 144483, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144483>.

KASMI, N.; BÄCKSTRÖM, E.; HAKKARAINEN, M. Open-loop recycling of post-consumer PET to closed-loop chemically recyclable high-performance polyimides. *Resources, Conservation and Recycling*, [S. l.], v. 193, p. 106974, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106974>.

KUMAR, M. et al. A review on value-addition to plastic waste towards achieving a circular economy. *Science of the Total Environment*, [S. l.], p. 171106, 2024.

KURAŃSKA, M. et al. Rebiopolyols – New components for the synthesis of polyurethane biofoams in line with the circular economy concept. *Chemical Engineering Journal*, [S. l.], v. 490, p. 151504, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151504>.

LUO, T. et al. Recent advances of sustainable and recyclable polymer materials from renewable resources. *Resources Chemicals and Materials*, [China], p. 100085, out. 2024.

MAJZOUN, W.; AL-MOHANNADI, D. M. Evaluating circularity and sustainability in plastic waste recycling: open and closed-loop technologies. 2024.

MELO, T. V. Têxteis orgânicos: nova moda. 2009. Tese (Doutorado) – [S. l.], 2009.

MÖLLNITZ, S. et al. Influence of pre-screening on down-stream processing for the production of plastic enriched fractions for recycling from mixed commercial and municipal waste. *Waste Management*, [S. l.], v. 119, p. 365–373, 2021. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.007>.

NAJMI, S. et al. Closed-loop chemical recycling of polyethylene furan-2,5-dicarboxylate (PEF) under microwave-assisted heating. *Green Chemistry*, [S. l.], v. 27, n. 20, p. 5753–5763, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5gc01583a>.

OBLAK, P. et al. Processability and mechanical properties of extensively recycled high density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, v. 114, p. 133–145, 2015.

OLAWUMI, M. A. et al. Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing. *Science of The Total Environment*, [S. l.], v. 905, p. 167109, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167109>.

OLAWUMI, M. A.; OLADAPO, B. I.; OLUGBADE, T. O. Evaluating the impact of recycling on polymer of 3D printing for energy and material sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, [S. l.], v. 209, p. 107769, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107769>.

OLIVEIRA, C. N. de et al. O paradigma da sustentabilidade na seleção de materiais e componentes para edificações. 2009. Disponível em: \[inserir link se houver]. Acesso em: \[inserir data de acesso].

ORDONSELLI, S.; KWOK, T. H.; MENG, Q. Removing carbon-black pigments from acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) using collector solvents. *Manufacturing Letters*, [S. l.], v. 35, p. 1293–1302, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.07.008>.

PITT, F. D.; BOING, D.; BARROS, A. A. C. Desenvolvimento histórico, científico e tecnológico de polímeros sintéticos e de fontes renováveis. *Revista da UNIFEBE*, v. 1, 2011.

PRADO, E. S. C. Avaliação do uso de PET e PE reciclado em embalagens cosméticas. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, v. 69, p. 24–58, 2017.

RAGAERT, Kim; DELVA, Laurens; VAN GEEM, Kevin. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, [S. l.], v. 69, p. 24–58, 2017. DOI: 10.1016/J.WASMAN.2017.07.044.

RAMOS, J. et al. Alternativas para o projeto ecológico de produtos. 2001.

RATHSACK, P.-H. et al. Chemical recycling of PC/ABS-blends by pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, \[S. l.], v. 188, p. 107047, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107047.

REAL, L. P. Comportamento e desempenho de produtos plásticos, materiais poliméricos com reciclados e biocompósitos com aplicação na construção (ECOPOL) - TAREFA T2.3 – Produtos poliméricos e compósitos de matriz plástica contendo reciclados com aplicação na construção. 2021.

RIBEIRO, H. J. da S. et al. Análise do processo de despolimerização de resíduos de resinas dentárias à base de PMMA em diferentes escalas de produção. 2024.

RIBUL, M. et al. Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, \[S. l.], v. 326, p. 129325, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325.

RICKERT, J.; CERDAS, F.; HERRMANN, C. Exploring the environmental performance of emerging (chemical) recycling technologies for post-consumer plastic waste. *Procedia CIRP*, \[S. l.], v. 90, p. 426–431, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.111.

ROMANI, A. et al. Recycled filtered contaminants from liquid-fed pyrolysis as novel building composite material. *Journal of Building Engineering*, \[S. l.], v. 102, p. 112025, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112025.

SANTOS, D. T. Por uma indústria mais sustentável: da ecologia à arquitetura. 2012. Tese (Doutorado) – \[S. n.], 2012.

SCHELTE, N.; HENDRICKX, B.; SEVERENGIZ, S. Life-cycle based evaluation of the environmental impact of chemical recycling vs. combined waste-to-energy and carbon-capture-and-utilization for selected epoxy resins. *Procedia CIRP*, \[S. l.], v. 116, p. 660–665, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.111.

SCHWARZ, A. E. et al. Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste Management*, \[S. l.], v. 121, p. 331–342, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020.

RAMOS, J. et al. Alternativas para o projeto ecológico de produtos. 2001.

RATHSACK, P.-H. et al. Chemical recycling of PC/ABS-blends by pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, \[S. l.], v. 188, p. 107047, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107047.

REAL, L. P. Comportamento e desempenho de produtos plásticos, materiais poliméricos com reciclados e biocompósitos com aplicação na construção (ECOPOL) - TAREFA T2.3 – Produtos poliméricos e compósitos de matriz plástica contendo reciclados com aplicação na construção. 2021.

RIBEIRO, H. J. da S. et al. Análise do processo de despolimerização de resíduos de resinas dentárias à base de PMMA em diferentes escalas de produção. 2024.

RIBUL, M. et al. Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production*, \[S. l.], v. 326, p. 129325, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325.

RICKERT, J.; CERDAS, F.; HERRMANN, C. Exploring the environmental performance of emerging (chemical) recycling technologies for post-consumer plastic waste. *Procedia CIRP*, \[S. l.], v. 90, p. 426–431, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.111.

ROMANI, A. et al. Recycled filtered contaminants from liquid-fed pyrolysis as novel building composite material. *Journal of Building Engineering*, \[S. l.], v. 102, p. 112025, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112025.

SANTOS, D. T. Por uma indústria mais sustentável: da ecologia à arquitetura. 2012. Tese (Doutorado) – \[S. n.], 2012.

SCHELTE, N.; HENDRICKX, B.; SEVERENGIZ, S. Life-cycle based evaluation of the environmental impact of chemical recycling vs. combined waste-to-energy and carbon-capture-and-utilization for selected epoxy resins. *Procedia CIRP*, \[S. l.], v. 116, p. 660–665, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.111.

SCHWARZ, A. E. et al. Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste Management*, \[S. l.], v. 121, p. 331–342, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020.

STEGMANN, P. et al. Plastic futures and their CO₂ emissions. *Nature*, v. 612, n. 7939, p. 272–276, 2022.

TISCHER, F. et al. Closed loop recycling approach for aged polyamide 12 feedstocks for powder bed fusion by precipitation from a moderate solvent combined with solvolysis. *Additive Manufacturing*, \[S. I.], v. 107, p. 104822, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104822.

TORETTI, T. Levantamento de dados para a implantação da coleta seletiva no município de Içara/SC: bairros Cristo Rei e Centro. 2014.

TOURNIER, V. et al. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, v. 580, p. 216–219, 2020.

VALERIO, O.; MUTHURAJ, R.; CODOU, A. Strategies for polymer to polymer recycling from waste: Current trends and opportunities for improving the circular economy of polymers in South America. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, v. 25, p. 100381, 2020.

VALSANGE, N. G. et al. Closed-loop chemically recyclable aromatic polyesters based on asymmetric dicarboxylates obtainable from lignocellulose. *Green Chemistry*, \[S. I.], v. 27, n. 20, p. 5770–5781, 2025. DOI: https://doi.org/10.1039/d4gc05572a.

VIDAKIS, N. et al. Thermomechanical recyclability of acrylonitrile styrene acrylate (ASA) for cyclic economy-driven MEX additive manufacturing. *Cleaner Engineering and Technology*, \[S. I.], v. 25, p. 100925, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100925.

WEILAND, F.; KOHLSTEDT, M.; WITTMANN, C. Biobased de novo synthesis, upcycling, and recycling—the heartbeat toward a green and sustainable polyethylene terephthalate industry. *Current Opinion in Biotechnology*, v. 86, p. 103079, 2024.

WERNER, T.; TAHA, I.; ASCHENBRENNER, D. An overview of polymer identification techniques in recycling plants with focus on current and future challenges. *Procedia CIRP*, \[S. I.], v. 120, p. 1381–1386, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.180.

WOLF, J.; GEROLD, J.; MÖHRING, H.-C. Development of an Extraction Hood for Efficient Chip Collection during the Finishing Process of FFF 3D Printed Parts. *Procedia CIRP*, \[S. I.], v. 122, p. 43–48, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.008.

WU, X. et al. Closed-loop recyclability of a biomass-derived epoxy-amine thermoset via methanolysis. *Science*, \[S. I.], v. 384, n. 6692, 2024. DOI: 10.1126/science.adj9989. Acesso em: 21 maio 2025.

XIONG, W. et al. Geminal dimethyl substitution enables controlled polymerization of penicillamine-derived β -thiolactones and reversed depolymerization. Chem, \[S. l.], v. 6, n. 7, p. 1831–1843, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chempr.2020.06.003.

YUGUE, E. T. Desafios e potenciais soluções para reciclagem de embalagens plásticas flexíveis pós-consumo no Brasil. 2020.

ZHANG, W.; KILLIAN, L.; THEVENON, A. Electrochemical recycling of polymeric materials. Chemical Science, Holanda, v. 15, n. 23, p. 8606–8624, 2024.

Recebido: 01/07/2025

Aprovado: 09/09/2025

DOI: 10.3895/rts.v21n66.20488

Como citar:

PAULA, Everton Luiz de; RODRIGUES, Jordane Silva; RIBEIRO, Josy Kelly; JÚNIOR, Willian Oliveira; VIEIRA, Luiz Henrique Oliveira Corcino; SILVA, Nathália da Cunha. Polímeros recicláveis: impulsionando a economia circular sustentável. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 21, n. 66, p. 228-250, seção temática, 2025. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/20488>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

