

CONTRIBUIÇÕES DA RECICLAGEM DE RESÍDUOS PLÁSTICOS PARA A ECONOMIA CIRCULAR E CRESCIMENTO SUSTENTÁVEL: UMA SÍNTSESE BIBLIOGRÁFICA

CONTRIBUTIONS OF PLASTIC WASTE RECYCLING TO THE CIRCULAR ECONOMY AND SUSTAINABLE GROWTH: A BIBLIOGRAPHIC SYNTHESIS

CONTRIBUCIONES DEL RECICLAJE DE RESIDUOS PLÁSTICOS A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y AL CRECIMIENTO SOSTENIBLE: UNA SÍNTESIS BIBLIOGRÁFICA

 <https://doi.org/10.56238/arev7n12-157>

Data de submissão: 15/11/2025

Data de publicação: 15/12/2025

Leandro Generoso de Almeida

Mestre em Administração de Empresas

Instituição: Faculdade Cenecista de Varginha (FACECA)

Minas Gerais, Brasil

E-mail: leandroalmeida@leandroalmeida.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3484311723037952>

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-7794-9686>

Lúcio Fábio Cassiano Nascimento

Doutor em Ciência dos Materiais

Instituição: Instituto Militar de Engenharia

Endereço: Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: lucionascimento@souunisuam.com.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7186497849886649>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3484-145X>

RESUMO

O artigo tem por objetivo sistematizar conhecimentos científicos e técnicos sobre reciclagem de resíduos plásticos, distinguindo a lógica linear de produção, consumo e descarte da abordagem circular, orientada à regeneração de recursos, extensão do ciclo de vida e revalorização de materiais. A metodologia consistiu em revisão bibliográfica estruturada com descritores em português e inglês, abrangendo periódicos científicos, revistas técnicas, relatórios setoriais, documentos governamentais e institucionais; foram identificados e analisados 75 documentos, agrupados nessas categorias. No eixo técnico, o texto apresenta fundamentos sobre polímeros e plásticos, destacando diferenças entre termoplásticos e termofixos, propriedades relevantes ao reprocessamento e implicações do uso de aditivos na triagem e na qualidade de resinas secundárias. São descritas e comparadas as rotas de reciclagem: primária, secundária (mecânica), terciária (química) e quaternária (energética) com ênfase nas condições práticas de aplicação e nos limites operacionais observados em fluxos pós-consumo. O trabalho organiza modelos de reciclagem e arranjos de gestão (triagem, logística, educação ambiental, comunicação social e indicadores de desempenho) e sistematiza dados nacionais de geração, composição e recuperação, com destaque para PET, PEAD, PEBD e PP. Os resultados subsidiam a implantação de protótipos locais de gestão de resíduos plásticos, priorizando integração intersetorial (governo, cooperativas, empresas, escolas e universidades), padronização de fluxos, rastreabilidade e

monitoramento por indicadores para aumentar a recuperação com qualidade e reduzir impactos ambientais.

Palavras-chave: Economia Circular. Resíduos Plásticos. Reciclagem. Polímeros. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The article aims to systematize scientific and technical knowledge on plastic waste recycling, distinguishing the linear logic of production, consumption, and disposal from the circular approach, which is oriented toward resource regeneration, product life-cycle extension, and material revalorization. The methodology consisted of a structured bibliographic review using descriptors in Portuguese and English, encompassing scientific journals, technical magazines, sectoral reports, and governmental and institutional documents; a total of 75 documents were identified and analyzed across these categories. In its technical scope, the text presents the fundamentals of polymers and plastics, highlighting the differences between thermoplastics and thermosets, key properties for reprocessing, and the implications of additive use in sorting processes and in the quality of secondary resins. The recycling routes — primary, secondary (mechanical), tertiary (chemical), and quaternary (energy recovery) — are described and compared, emphasizing practical application conditions and operational limits observed in post-consumer flows. The study also organizes recycling models and management arrangements (sorting, logistics, environmental education, social communication, and performance indicators) and systematizes national data on waste generation, composition, and recovery, with emphasis on PET, HDPE, LDPE, and PP. The results support the implementation of local prototypes for plastic waste management, prioritizing intersectoral integration (government, cooperatives, companies, schools, and universities), flow standardization, traceability, and performance monitoring to enhance quality recovery and reduce environmental impacts.

Keywords: Circular Economy. Plastic Waste. Recycling. Polymers. Sustainability.

RESUMEN

Este artículo busca sistematizar el conocimiento científico y técnico sobre el reciclaje de residuos plásticos, diferenciando la lógica lineal de producción, consumo y disposición del enfoque circular, orientado a la regeneración de recursos, la extensión del ciclo de vida y la revalorización de materiales. La metodología consistió en una revisión bibliográfica estructurada, utilizando descriptores en portugués e inglés, que abarcan revistas científicas, revistas técnicas, informes sectoriales y documentos gubernamentales e institucionales. Se identificaron y analizaron 75 documentos, agrupados en estas categorías. En la sección técnica, el texto presenta los fundamentos de polímeros y plásticos, destacando las diferencias entre termoplásticos y termoestables, las propiedades relevantes para el reprocesamiento y las implicaciones del uso de aditivos en la clasificación y la calidad de las resinas secundarias. Se describen y comparan las rutas de reciclaje: primaria, secundaria (mecánica), terciaria (química) y cuaternaria (energética), con énfasis en las condiciones de aplicación práctica y los límites operativos observados en los flujos posconsumo. Este trabajo organiza modelos de reciclaje y mecanismos de gestión (clasificación, logística, educación ambiental, comunicación social e indicadores de desempeño) y sistematiza datos nacionales sobre generación, composición y recuperación, con énfasis en PET, HDPE, LDPE y PP. Los resultados apoyan la implementación de prototipos locales para la gestión de residuos plásticos, priorizando la integración intersectorial (gobierno, cooperativas, empresas, escuelas y universidades), la estandarización de flujos, la trazabilidad y el monitoreo mediante indicadores para aumentar la calidad de la recuperación y reducir el impacto ambiental.

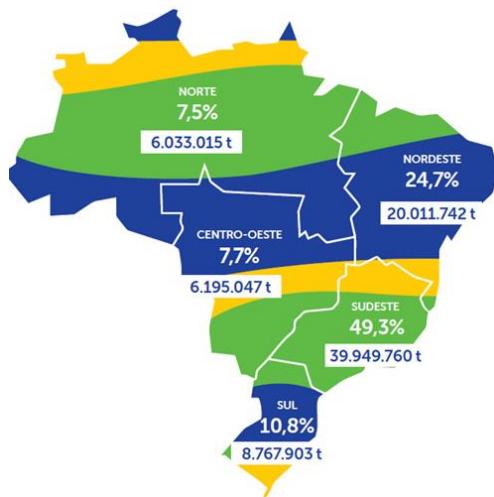
Palabras clave: Economía Circular. Residuos Plásticos. Reciclaje. Polímeros. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

“Gestão de resíduos plásticos”, um tema que figura atualmente entre os assuntos centrais das agendas ambientais internacionais, o motivo está na intensificação da produção, consumo e descarte de materiais sintéticos. O relatório Global Plastics Outlook, publicado pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) em 2022, apresenta que mais de 430 milhões de toneladas de plásticos foram produzidas mundialmente naquele ano, sendo que mais de dois terços desse total foi destinado ao descarte após o primeiro uso. Apenas 9% desse volume foi reciclado, enquanto cerca de 50% foi enviado para aterros e 22% foi abandonado em sistemas abertos. A estimativa da OECD projeta que, se mantido esse padrão, até 2060 a produção de resíduos plásticos poderá triplicar. Esses dados reforçam o alerta sobre a insustentabilidade do atual modelo de produção e consumo de plásticos, cuja expansão descontrolada impacta diretamente ecossistemas aquáticos, cadeias alimentares e a saúde humana. Em razão disso, a necessidade de revisão estrutural dos sistemas produtivos e da gestão dos resíduos plásticos demanda atenção, especialmente a partir de enfoques que promovam o reaproveitamento dos materiais e a transição para economias de ciclo fechado.

No Brasil, a situação revela um paradoxo entre a expressiva geração de resíduos e os baixos índices de reaproveitamento. De acordo com a ABRELPE (2024), em seu Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, foram geradas aproximadamente 80,96 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no país em 2023. Esse volume corresponde a 221 mil toneladas por dia e uma média anual de 382 kg por habitante. A região Sudeste foi responsável por quase 50% do total gerado, enquanto a região Sul apresentou os menores índices per capita.

Figura 1 – Participação regional na geração brasileira de RSU em 2023



Fonte: (ABRELPE, 2023; p.27)

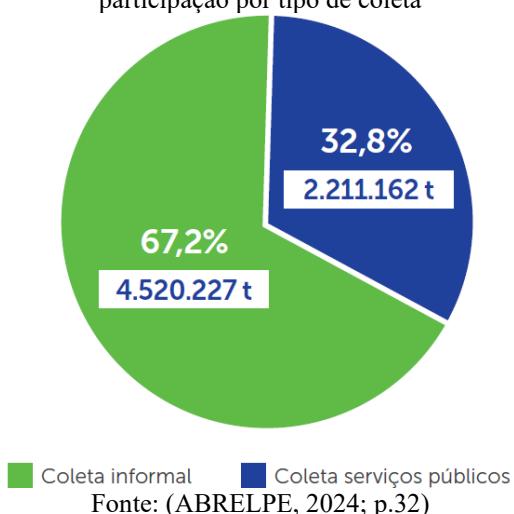
Apesar da coleta atingir 93,4% dos resíduos, ainda restam cerca de 6,6% sem recolhimento adequado, o que equivale a mais de 5 milhões de toneladas ao ano. Além disso, cerca de 41,5% dos resíduos coletados são destinados a locais ambientalmente inadequados, como lixões, valas e áreas irregulares. Esse contraste entre a geração crescente de resíduos e as limitações nos processos de reaproveitamento corrobora a persistência de um modelo linear de consumo e descarte, caracterizado pela lógica de extração, produção, uso único e eliminação. Tal modelo, amplamente difundido nos sistemas industriais, resulta não apenas em desperdício de recursos, mas também em múltiplos impactos socioambientais. Entre os principais efeitos, destacam-se a contaminação de corpos hídricos, a emissão de gases de efeito estufa oriundos da decomposição em aterros e da incineração, além do comprometimento da biodiversidade. A literatura científica aponta que a superação desse paradigma depende da implementação de práticas baseadas na economia circular, as quais priorizam o redesign de produtos, o uso de insumos recicláveis e a criação de cadeias produtivas regenerativas. Nesse sentido, a circularidade aplicada à gestão de resíduos plásticos busca reverter os efeitos negativos da obsolescência programada e do descarte imediato, incentivando soluções como logística reversa, ecodesign e revalorização de materiais. A consolidação desse modelo, no entanto, requer investimentos coordenados em infraestrutura, regulação e conscientização social.

Nesse cenário, a economia circular se mostra como forma alternativa ao modelo linear tradicional, propondo uma reorganização sistêmica dos processos produtivos e de consumo, orientada pela eficiência no uso de recursos, extensão do ciclo de vida dos produtos e revalorização dos resíduos. Para os resíduos plásticos, esse modelo representa a possibilidade de reinserção dos materiais no sistema produtivo por meio de estratégias como a reutilização, remanufatura, recuperação e reciclagem, minimizando a extração de matérias-primas virgens e mitigando os impactos ambientais do descarte inadequado. A economia circular fundamenta-se nos princípios da natureza regenerativa, do design sistêmico e da valorização do resíduo como recurso (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). No contexto dos materiais poliméricos, essa abordagem exige repensar desde a formulação das resinas até o ecodesign das embalagens e a criação de cadeias reversas eficientes. A transição para a circularidade não se limita à inovação tecnológica, mas requer mudanças culturais, institucionais e regulatórias. No Brasil, a economia circular ainda é incipiente e frequentemente confundida com programas isolados de reciclagem. A falta de políticas públicas integradas, a desarticulação entre os entes federativos e a baixa valorização das cadeias locais de reaproveitamento dificultam a construção de uma governança circular. Nesse sentido, torna-se necessário a compreensão dos fundamentos conceituais da circularidade para a estruturação de soluções integradas, conectadas à realidade social e produtiva dos territórios.

A transição para a economia circular no setor de resíduos plásticos é condicionada por múltiplas barreiras de ordem técnica, econômica e cultural. Do ponto de vista tecnológico, muitos tipos de plásticos, como os utilizados em embalagens multicamadas, laminados metalizados ou produtos contaminados, apresentam baixa reciclagem ou exigem processos complexos e dispendiosos, como a reciclagem química ou energética. Segundo Monteiro (2018), a reciclagem química, apesar de promissora, ainda é pouco difundida no Brasil devido aos altos custos operacionais, à falta de incentivos fiscais e à escassez de infraestrutura especializada. Além disso, a reciclagem mecânica, predominante no país, enfrenta limites relacionados à degradação do material ao longo dos ciclos, à contaminação da matéria-prima e à dificuldade de triagem manual. Culturalmente, ainda há uma lacuna no que diz respeito à educação ambiental e à conscientização da população quanto à separação dos resíduos na origem e ao papel da reciclagem na sustentabilidade. Esses fatores se refletem diretamente na eficácia da coleta seletiva, cuja cobertura nacional ainda é limitada e fortemente concentrada em centros urbanos de maior renda. A informalidade nas cadeias de triagem e a ausência de programas estruturados de logística reversa aprofundam esse cenário de ineficiência.

A reciclagem de resíduos plásticos, embora frequentemente associada a tecnologias e soluções industriais, possui uma forte dimensão social, especialmente em países como o Brasil, onde grande parte do reaproveitamento de materiais ocorre por meio do trabalho de catadores e cooperativas. Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2024), 67% dos materiais recicláveis recuperados em 2023 foram provenientes da atuação de catadores autônomos e cooperativas, enquanto apenas 33% resultaram de sistemas públicos formais. Esse dado traz luz ao papel central das organizações de base na cadeia da reciclagem.

Figura 2 – Quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) secos enviados para reciclagem no Brasil em 2023 – participação por tipo de coleta



Tais agentes enfrentam, no entanto, condições precárias de trabalho, falta de reconhecimento institucional e limitações estruturais em suas operações. O estudo de Rodrigues et al. (2020), ao analisar a atuação da cooperativa de catadores de Ilhéus-BA, revelou que, quando há apoio técnico, jurídico e logístico, essas organizações conseguem aumentar sua eficiência, renda e impacto ambiental. Por isso, a valorização do trabalho cooperado, por meio de políticas de inclusão produtiva, financiamento e formação, torna-se estratégica para o fortalecimento da economia circular. Além disso, as cooperativas têm um papel educativo e mobilizador nas comunidades, atuando na conscientização da população quanto à importância da separação dos resíduos e à promoção de práticas ambientalmente responsáveis. Portanto, a dimensão social da circularidade deve ser compreendida não como um apêndice do modelo técnico, mas como seu componente estruturante, capaz de integrar desenvolvimento econômico, justiça ambiental e cidadania.

2 METODOLOGIA

A revisão bibliográfica foi conduzida com descritores bilíngues estruturados para cobrir quatro eixos, economia circular (“economia circular”, “circular economy”), resíduos plásticos (“resíduos plásticos”, “plastic waste”), fundamentos de materiais (“polímeros”, “polymers”, “thermoplastics”, “thermosets”) e rotas e modelos de reciclagem (“reciclagem mecânica”, “mechanical recycling”, “chemical recycling”, “energy recovery”, “gestão de resíduos”, “waste governance”). A busca ocorreu em bases indexadas e portais, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley, MDPI, SciELO, além de repositórios e fontes institucionais (OECD, UNEP, EFSA, ABRELPE, ABIPLAST, MMA). Como critérios de inclusão foram considerados estudos revisados por pares e documentos institucionais oficiais com DOI ou URL persistente, aderência direta aos eixos temáticos, escopo aplicado a polímeros e gestão de resíduos plásticos, métodos transparentes e dados verificáveis. Como critérios exclusão, foram blogs, notícias, páginas sem revisão científica, duplicatas e documentos sem rastreabilidade.

O período de busca cobriu o período de 2014 a 2025, admitindo clássicos anteriores quando necessários para bases conceituais. O processo seguiu as etapas recomendadas para revisões sistemáticas narrativas, planejamento de questão e descritores, seleção por títulos e resumos, leitura integral e extração de dados, com registro em planilha de rastreabilidade e arquivamento de todos os arquivos originais (Gough; Oliver; Thomas, 2017). No total, 85 documentos foram de fato incluídos, distribuídos entre artigos científicos, normas, relatórios e literatura técnica. A avaliação priorizou clareza metodológica, coerência entre objetivo, método e resultados e aplicabilidade a arranjos locais

de gestão. A síntese dos achados seguiu princípios de agregação temática e triangulação entre fontes (Grant; Booth, 2009), compondo os quadros e seções analíticas do capítulo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ECONOMIA LINEAR E RESÍDUOS PLÁSTICOS

A economia linear, enquanto modelo predominante desde a Revolução Industrial, baseia-se na lógica da extração, produção, consumo e descarte, sustentando-se em fluxos materiais que ignoram a finitude dos recursos naturais. Essa estrutura produtiva prioriza a maximização do uso de matérias-primas virgens e o descarte imediato dos bens de consumo ao final de sua vida útil, o que gera um volume crescente de resíduos sem retorno ao ciclo econômico. Esse modelo se caracteriza por uma baixa eficiência no reaproveitamento dos insumos utilizados, refletindo em um acúmulo sistemático de rejeitos e na intensificação dos impactos ambientais associados à sua disposição inadequada. Em termos operacionais, essa lógica resulta na eliminação do valor residual dos materiais, reduzindo o sistema produtivo a um processo unidirecional. O conceito de economia linear, nesse sentido, encontra-se diretamente relacionado às crescentes discussões e pesquisas sobre a gestão dos resíduos plásticos, fomentadas pela produção em massa de itens com alto grau de descartabilidade e baixo índice de reinserção nos sistemas industriais.

A crítica à economia linear não é apenas em relação à sua sequência de ações, mas sobretudo às repercussões ambientais. Esse modelo, com sua sequência simplista e linear, tem imposto desafios crescentes à sustentabilidade do planeta, manifestando-se através da exploração excessiva de recursos e do consequente acúmulo de resíduos (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017).

Como demonstrado na figura 3, a economia linear implica numa cadeia baseada na produção, consumo e descarte de recursos naturais.

Figura 3 – Fluxo da economia linear

ECONOMIA LINEAR

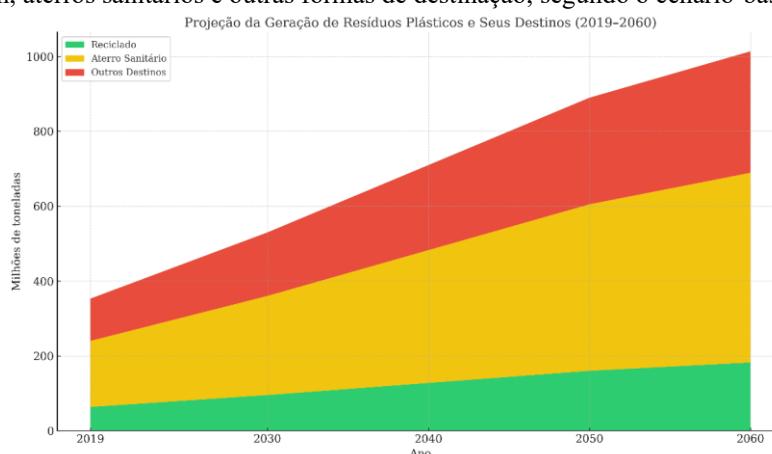


Fonte: ALLEN, 2023

A ampliação do debate sobre o modelo linear, portanto, deve estar centrada não apenas em suas falhas operacionais, mas também em seus desdobramentos sociais e ambientais, exigindo a incorporação de alternativas estruturadas e integradas à realidade local.

Considerando a produção massiva de materiais sintéticos, como os plásticos de uso único, é intensificada a pressão sobre recursos fósseis o que compromete de forma veemente os esforços de mitigação das mudanças climáticas. A OECD (2024) aponta que, mantido o padrão atual, a geração de resíduos plásticos poderá triplicar até 2060, com impactos diretos sobre as emissões de gases de efeito estufa e a integridade dos sistemas marinhos e terrestres. Estima-se que a geração global de resíduos plásticos aumente de 353 milhões de toneladas em 2019 para 1.014 milhões em 2060, evidenciando a intensificação da produção e a baixa circularidade dos materiais. Apesar dos avanços em tecnologias de reciclagem, menos de 20% desses resíduos será reciclado, enquanto cerca de 50% continuará sendo enviado para aterros sanitários.

Figura 4: Projeção da Geração de Resíduos Plásticos e Seus Destinos (2019–2060) - Distribuição estimada entre reciclagem, aterros sanitários e outras formas de destinação, segundo o cenário-base da OCDE



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de OECD (2022). Global plastics outlook: policy scenarios to 2060. p. 29.
Disponível em: <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>. Acesso em: 16 abr. 2025.

Os efeitos negativos dessa projeção são ainda mais potencializados quando se considera que grande parte dos resíduos plásticos é composta por embalagens, produtos de vida de longa vida útil e baixa reciclagem, cuja destinação final frequentemente escapa aos sistemas formais de coleta. Outro fator a ser considerado é a baixa eficácia da reciclagem mecânica, principal método aplicado nos países em desenvolvimento, com limitações técnicas impostas pela contaminação do material, pela baixa pureza das resinas coletadas e pela ausência de padronização nos processos de triagem (MONTEIRO, 2018). Tais barreiras comprometem não apenas o retorno dos materiais ao ciclo produtivo, mas também a viabilidade econômica das atividades de reaproveitamento. Como

consequência, o valor residual dos rejeitos plásticos é subaproveitado, intensificando externalidades ambientais negativas.

3.2 ECONOMIA CIRCULAR

A economia circular estabelece-se como uma alternativa sistêmica ao modelo econômico linear tradicional, fundamentando-se na ideia de que os recursos naturais devem ser utilizados de forma contínua. Como elucidada por Murray; Skene e Haynes (2017), a economia circular é essencialmente regenerativa. Visa não somente reduzir o impacto ambiental, mas ativamente reverter os danos causados. O cerne desta abordagem repousa no ideal de que recursos podem e devem ser constantemente reciclados, reutilizados e reintegrados aos processos produtivos, formando um ciclo contínuo de aproveitamento conforme demonstrado na figura 5.

Figura 5 – Fluxo da economia circular



Fonte: Adaptado de COMMISSION EUROPEAN, 2023

A proposta não se resume à reciclagem, mas envolve a reestruturação completa dos sistemas de produção e consumo, com base em princípios de eficiência, durabilidade, modularidade, reparabilidade e uso compartilhado. Conforme destaca a Ellen MacArthur Foundation (2017), trata-se de um modelo econômico “restaurativo e regenerativo por design”, que busca eliminar o conceito de resíduo por meio da manutenção do valor dos recursos dentro da economia pelo maior tempo possível. Essa perspectiva adota como referência os sistemas naturais, nos quais os materiais circulam em ciclos fechados, sem geração de descarte permanente. Os ciclos da economia circular são divididos em técnico (voltado a materiais sintéticos, metais e polímeros) e biológico (aplicável a biomassa, resíduos orgânicos e compostáveis), permitindo que cada classe de material siga caminhos adequados de revalorização.

Dentro do escopo da economia circular, a sustentabilidade é vista de forma holística, abrangendo além das práticas já citadas: reciclagem, reuso, logística reversa e remanufatura - a

valorização econômica dos materiais. Além disso, dá-se atenção ao ciclo de vida da matéria-prima, buscando maximizá-lo e garantindo que os produtos sejam projetados não apenas para durar, mas também para serem desmontados e reutilizados (SILVA et al., 2021). Esse aspecto, sublinhado por Silva et al. (2021), traz à tona uma necessidade de repensar as cadeias produtivas, enfatizando a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, consumidores e formuladores de políticas públicas.

Este novo paradigma, que coloca a gestão sustentável de recursos no epicentro da produção e do consumo, demanda uma cooperação estreitada entre diversos atores. Como mencionado por Bahers; Durand e Beraud (2017), o sucesso da economia circular não repousa exclusivamente em tecnologias ou inovações isoladas, mas exige um esforço colaborativo e coordenado de sociedades inteiras. Contudo, no Brasil o caminho em direção à economia circular ainda se encontra em seus estágios iniciais. A consciência acerca dos riscos inerentes à economia linear e da iminente escassez de recursos não se manifesta de forma plena no cenário nacional. Estudos como o de Carrière, Diniz e de la Mora (2020) mostram a discrepância entre os ideais da economia circular e a realidade prática, como observado em cidades como Recife por exemplo.

A análise desses autores sobre a capital pernambucana expôs um cenário onde a preocupação com a renovação de recursos é tímida, circunscrita a ações pontuais como coleta seletiva de resíduos ou tratamento de aterros. Por observação, essa é uma hipótese de realidade da maioria das cidades brasileiras. A transição para a economia circular requer não apenas inovações tecnológicas e reestruturações produtivas, mas também um alinhamento institucional que reflita essa nova lógica sistêmica nos marcos legais e regulatórios. Até 2004, quando ainda vigorava a ABNT NBR 12980:1993, a definição normativa de resíduos sólidos refletia uma concepção alinhada ao modelo linear, ao descrevê-los como ‘materiais desprovidos de utilidade pelo seu possuidor’. Tal concepção, hoje superada, divergia do ethos da economia circular ao relegar os resíduos ao ostracismo, desconsiderando seu potencial de reintegração produtiva. Embora a atual Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei n.º 12.305/2010) atualizada pelo Decreto n.º 12.688/2025 (BRASIL, 2010; 2025), represente um avanço ao incorporar o conceito de reutilização, ainda carece de uma definição normativa que explice a valorização do resíduo como recurso, o que mantém lacunas semânticas na política regulatória brasileira.

3.3 POLÍMEROS E PLÁSTICOS: TIPOS, PROPRIEDADES, USO E REPROCESSAMENTO

A consolidação da economia circular aplicada à gestão de resíduos plásticos depende, em primeiro lugar, da compreensão sobre a natureza e o comportamento dos materiais que compõem esse grupo. Callister e Rethwisch (2018) observam que a versatilidade dos plásticos decorre da variedade

de composições químicas e dos processos de conformação, o que permite ajustar propriedades como densidade, elasticidade e resistência térmica conforme a função desejada. Essa adaptabilidade fez dos polímeros os materiais mais utilizados em embalagens, bens de consumo, construção civil, eletrônicos e setor automotivo. Shackelford (2014) acrescenta que a moldabilidade em diferentes temperaturas e o baixo custo de processamento tornaram os plásticos elementos centrais de manufatura. Contudo, as mesmas características que favorecem seu uso também explicam as dificuldades de reaproveitamento, já que a multiplicidade de formulações e aditivos interfere na separação e na pureza dos fluxos recicláveis.

Considerando os aspectos funcionais, Bucknall (2020) discute que a ampla disseminação dos plásticos se deve ao equilíbrio entre desempenho técnico e economia de material, mas adverte que a eficiência aparente no uso imediato esconde custos ambientais posteriores. A durabilidade química e a resistência à degradação, propriedades desejadas para aumentar a vida útil do produto, são também as responsáveis por sua persistência no ambiente. Essa dualidade coloca o setor produtivo diante do desafio em reduzir a dependência de polímeros virgens e, ao mesmo tempo, preservar as vantagens que os tornaram indispensáveis. A proposta de circularidade parte justamente dessa contradição, ao buscar prolongar o valor do material sem perpetuar seus impactos. A literatura especializada tem destacado que a chave para aumentar a circularidade dos plásticos está no redesenho dos produtos e na simplificação das composições. A Ellen MacArthur Foundation (2017) sugere que as cadeias produtivas incorporem princípios de *design for recycling*, eliminando combinações de materiais de difícil separação, como embalagens multicamadas, e substituindo aditivos degradantes por alternativas seguras e rastreáveis. Essa reconfiguração demanda um planejamento que começa na concepção do produto, de modo que a reciclagem e a remanufatura se tornem soluções intrínsecas e não respostas corretivas ao fim da vida útil. Ragaert, Delva e Van Geem (2017) complementam que o desempenho dos processos de revalorização depende diretamente da pureza dos fluxos e da manutenção das propriedades físico-químicas ao longo dos ciclos, o que reforça a importância de projetos que reduzam contaminações e misturas incompatíveis. Hahladakis et al. (2018) chamam atenção para a presença de aditivos como plastificantes, estabilizantes e retardantes de chama, que são essenciais para a funcionalidade do produto, mas podem liberar substâncias indesejáveis durante o uso e o reprocessamento. Essa complexidade química impõe restrições à reciclagem mecânica, além de exigir o monitoramento de contaminantes e a definição de limites de reaproveitamento em aplicações sensíveis. Essas barreiras atestam que a circularidade dos rejeitos plásticos não depende apenas de tecnologias de reciclagem, mas também de políticas de rastreabilidade e de controle de

substâncias, como propõe a OECD (2024) em seus relatórios sobre conteúdo reciclado e transparência de cadeia.

Canevarolo (2010) explica que, sob a perspectiva estrutural, os polímeros podem ser classificados em termoplásticos e termorrígidos, distinção que define seu comportamento térmico e as possibilidades de reprocessamento. Essa categorização é um conceito basilar para entender as rotas de reciclagem que será detalhada a seguir, pois permite identificar quais materiais podem ser remodelados por fusão e quais demandam alternativas químicas ou energéticas. Na prática, o emprego de termoplásticos é predominante em embalagens e artigos de uso breve, resultado direto da capacidade dessas resinas de serem moldadas e remoldadas sem perda estrutural acentuada. Canevarolo (2010) descreve que polímeros como o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o politereftalato de etileno (PET) reúnem características de baixa densidade, resistência química e facilidade de processamento, o que os torna adequados para frascos, filmes e tampas. Callister e Rethwisch (2018) acrescentam que o controle de parâmetros térmicos e mecânicos durante o processamento permite ajustar propriedades como transparência, barreira e rigidez, ampliando o uso dessas resinas em setores de embalagem e consumo doméstico. A ABIPLAST (2024) corrobora essa observação ao indicar que o setor de embalagens é o principal destino das resinas recicladas no país, com forte presença de termoplásticos nas categorias rígidas e flexíveis.

Em contrapartida, materiais termofixos são amplamente empregados em componentes estruturais e eletroeletrônicos, por apresentarem maior estabilidade térmica e resistência mecânica após a cura. Shackelford (2014) explica que as resinas epóxi e fenólicas são utilizadas como matrizes em compósitos, adesivos e laminados, especialmente em aplicações que exigem resistência elétrica e dimensional. Callister e Rethwisch (2018) também observam que o comportamento rígido e a resistência à deformação térmica tornam esses materiais adequados para a fabricação de encapsulantes, carcaças e substratos de circuitos impressos. Apesar dessa distinção, a fronteira entre aplicações de termoplásticos e termofixos tem se tornado mais dinâmica com o avanço de pesquisas que buscam conciliar processabilidade e desempenho em novos sistemas poliméricos.

A sequência demanda a apresentação organizada das famílias de resinas que abastecem a cadeia de embalagens, em consonância com a predominância de termoplásticos que foi registrada para os fluxos de reciclagem nacionais ao longo de 2023, com destaque para embalagens rígidas e flexíveis em rotas de revalorização já conhecidas (ABIPLAST, 2024). A marcação do material com o código de resina (Figura 6), prescrita para embalagens e acondicionamentos, atua como referência de leitura no recebimento e na inspeção de qualidade, favorecendo a associação entre família polimérica, aplicação típica e direcionamento de reciclagem. A seguir o Quadro 2 descreve esses elementos e

traduz a relação entre estrutura do material, usos prevalentes e potencial de revalorização para a realidade operacional. A sistematização apresentada permite visualizar, de maneira direta, como os plásticos mais utilizados se distribuem entre diferentes funções e graus de reciclagem. Ao relacionar cada resina às suas aplicações e rotas de reaproveitamento, o instrumento auxilia a compreender por que determinadas embalagens e produtos retornam com maior frequência às cadeias de triagem e de reprocessamento. Essa visão comparativa favorece também a formulação de estratégias de design e de políticas que considerem o ciclo de vida completo do material, do consumo à reinserção produtiva, funciona como referência de leitura rápida sobre o comportamento das principais resinas e suas limitações de reuso, traduzindo em linguagem aplicada as informações estruturais discutidas ao longo dessa seção.

Quadro 1 – Materiais plásticos, aplicações e reciclagem.

Quadro 1 - Materiais Plásticos, Aplicações e Reciclagem

MATERIAL	TIPO	NOMES COMERCIAIS	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO	APLICAÇÕES TÍPICAS	RECICLAGEM E POTENCIAL DE REAPLICAÇÃO (TIPO DE RECICLAGEM E USO FINAL)
Polipropileno (PP)	Termoplástico	Hicor, Meraklon, Metocene, Polypuro, Pro-fax, Propak, Propathene	Resistente à distorção térmica; excelentes propriedades eléticas; boa resistência à fadiga; quimicamente inerte; relativamente barato; resistência limitada à radiação ultravioleta	Garrafas esterilizáveis, filmes para embalagens, painéis internos de automóveis, fibras, bagagens. Também utilizado em tampas, brinquedos e utensílios domésticos	Reciclagem mecânica preferencial; reaproveitado na fabricação de escovas, caixas, peças moldadas e embalagens secundárias. Justifica-se pela boa estabilidade térmica e manutenção parcial das propriedades após reprocessamento. Custo: baixo.
Polietileno (PE)	Termoplástico	Alathon, Hostalen, Rigidex	Flexível (baixa densidade) a rígido (alta densidade); relativamente barato; excelente resistência química e à umidade	Embalagens plásticas, recipientes de leite, tubos, brinquedos, isolantes de fios e cabos. Também empregado em tanques e revestimentos técnicos	Reciclagem mecânica preferencial; aplicado em sacos de lixo, tubos corrugados, pallets e artefatos técnicos. A boa resistência química e à tração permite o uso industrial após reaproveitamento. Custo: baixo.
Poliestireno (PS)	Termoplástico	Lustrex, Styron	Rígido, transparente; relativamente barato; excelente isolante elétrico; frágil	Copos descartáveis, utensílios domésticos, gabinetes de equipamentos, embalagens protetoras. Também aplicado em molduras e carcaças de baixo esforço	Reciclagem mecânica ou energética. Pode ser reprocessado em itens de menor exigência técnica, como cabides, molduras ou enchimentos. A fragilidade térmica limita sua estabilidade no reprocessamento. Custo: médio.
Cloreto de polivinila (PVC)	Termoplástico	Geon, Vinatek	Pode ser rígido ou flexível; translúcido; relativamente barato; resistente à chama	Tubos, revestimentos de fios e cabos, mangueiras, pisos, cortinas de banheiro. Também utilizado em perfis de janelas e cartões	Reciclagem mecânica com restrições; requer separação rigorosa por conter aditivos halogenados. Usado em condutões, calhas e tapetes. A liberação de HCl na queima limita a recuperação energética. Custo: médio a alto.
Polietileno tereftalato (PET)	Termoplástico	Arnite, Cleartuf, Rynite, Tenite, Valox	Transparente; relativamente barato; excelentes resistência à tração e estabilidade química	Garrafas de bebidas, fitas magnéticas, tecidos, filmes. Também aplicado em bandejas, fibras de tapetes e laminados	Reciclagem mecânica e química. Utilizado em fibras têxteis, enchimentos, bandejas e novas embalagens (não alimentícias). Sua alta cristalinidade e separabilidade facilitam o reprocessamento. Custo: baixo.
Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)	Termoplástico	Cycloc, Lustran, Terluran	Alta resistência ao impacto e boa resistência térmica; boa estabilidade dimensional; boa usinabilidade	Componentes automotivos, eletrodomésticos, telefones, brinquedos. Também usado em capacetes e gabinetes de ferramentas	Reciclagem mecânica possível, mas com perda de desempenho. Aplicado em peças de baixa exigência estrutural, como suportes, perfis ou molduras. Reprocessamento limitado por oxidação térmica. Custo: médio.
Acrílico (PMMA)	Termoplástico	Acrylite, Lucite, Plexiglas, Perspex	Transparente; excelente resistência às intempéries; boa resistência química e ao impacto; usinável	Leteiros, faróis automotivos, displays, janelas de aeronaves. Também em escudos de proteção e peças óticas	Reciclagem mecânica viável, mas com degradação óptica. Aplicado em produtos opacos, peças moldadas, sinalizações e protetores. Custo: médio.
Policarbonato (PC)	Termoplástico	Lexan, Makrolon, Merlin, Zelux	Transparente; resistência muito elevada ao impacto; boa estabilidade dimensional; relativamente caro	Vidros de segurança, escudos policiais, dispositivos médicos, componentes eletrônicos, DVDs	Reciclagem química recomendada (hidrólise ou solvolise); pode gerar monômeros ou materiais moldáveis. A reciclagem mecânica é possível com degradação parcial. Custo: alto.
Polietileno de cloro sulfônado (CSPE)	Termoplástico	Hypalon	Resistente a intempéries, produtos químicos e abrasão; boa flexibilidade em baixas temperaturas	Revestimentos de cabos, coberturas industriais, membranas impermeabilizantes	Reciclagem energética mais viável. A presença de halogénios dificulta o reprocessamento mecânico. Aplicações pós-reciclagem são raras. Custo: alto.
Politetrafluoretileno (PTFE)	Termoplástico	Teflon	Excelente resistência química e térmica; baixo coeficiente de atrito; não aderente; caro	Revestimentos antiaderentes, vedações químicas, mancas, isoladores elétricos. Também utilizado em aplicações biomédicas	Reciclagem química (pirólise ou degradação controlada) é possível, mas pouco utilizada. Reutilizado em compostos têxteis e peças moldadas. Custo: alto.
Poliacetil (POM)	Termoplástico	Celcon, Delrin, Hostaflex	Alta resistência mecânica e à fadiga; excelente estabilidade dimensional; baixo coeficiente de atrito	Engrenagens, buchas, roldanas, fechos de cinto, válvulas. Também utilizado em conectores e peças de precisão	Reciclagem mecânica possível com restrições. Reutilizado em peças têxteis não estruturais. A estabilidade térmica e o baixo atrito favorecem usos secundários. Custo: médio.
Polissulfona (PSU)	Termoplástico	Udel	Transparente; excelente resistência a altas temperaturas e à hidrólise; boa resistência química	Componentes médicos e laboratoriais, peças de sistemas de filtração e eletrodomésticos	Reciclagem química mais adequada devido à resistência térmica. Pode ser reaproveitada em compósitos ou peças de menor exigência. Custo: alto.
Poliéster-éter-cetona (PEEK)	Termoplástico	Victrex	Excelente resistência térmica, química e mecânica; boa estabilidade dimensional; muito caro	Componentes aeronáuticos, biomédicos, válvulas, peças estruturais de alto desempenho	Reciclagem mecânica limitada, preferível recuperação por extrusão controlada. Reutilizado em peças têxteis com menor exigência. Custo: alto.
Polissiloxano (Silicone)	Termoplástico (ou Elastómero)	Silastic, Dow Corning	Flexível; resistente a temperaturas extremas; excelente biocompatibilidade; isolante elétrico; caro	Implantes médicos, selantes, moldes, vedações, isolantes térmicos e elétricos	Reciclagem química (pirólise ou solvolise) é possível. Pode ser reutilizado em vedantes e selantes não estruturais. Custo: alto.
Resina fenólica (PF)	Termofixo	Bakelite, Durite, Phenolformaldehído	Rígido; boa resistência ao calor e produtos químicos; isolante elétrico; relativamente barato	Bases de tomadas, painéis elétricos, peças de eletrodomésticos, utensílios resistentes ao calor	Reciclagem energética ou química (pirólise) é recomendada. Reaproveitado como carga em compósitos de baixo desempenho. Inviável reciclagem mecânica. Custo: alto.
Resina epóxi (EP)	Termofixo	Epon, Epi-Rez, Araldite, Epicote	Rígido; excelente adesão a diferentes superfícies; boa resistência térmica e química; relativamente caro	Adesivos estruturais, circuitos impressos, revestimentos industriais, isoladores elétricos	Reciclagem química (solvolise ou pirólise) é recomendada. Pode ser reutilizada como carga em compósitos ou em recuperação energética. Custo: alto.
Resina melamínica (MF)	Termofixo	Melmac, Formica	Rígido; resistente ao calor, riscos e produtos químicos; translúcido; relativamente barato	Revestimentos de móveis, utensílios de cozinha, painéis decorativos	Reciclagem energética ou trituração para enchimento. A reticulação impede o reprocessamento térmico. Usado como carga em moldagens. Custo: médio a alto.
Resina ureia-formaldeído (UF)	Termofixo	Beetle, Kaurit, Uformite	Rígido; translúcido; relativamente barato; boa estabilidade dimensional e propriedades eléticas	Interruptores, soquetes, utensílios plásticos, madeira aglomerada	Reciclagem energética recomendada. Reutilização técnica muito limitada. Pode ser transformado em pó para carga de baixo desempenho. Custo: médio.
Resina de poliéster insaturado (UP)	Termofixo	Atlac, Crystic, Vibrim	Boa resistência à corrosão e intemperismo; endurece por cura com catalisador; translúcido	Carrocerias, cascos de embarcações, tubos, banheiras, revestimentos	Reciclagem química (pirólise ou glicólise) é tecnicamente viável. Usado como matriz para compósitos reciclados ou recuperação energética. Custo: médio a alto.
Poliuretano (PU)	Termofixo (ou Elastómero)	Adiprene, Estane, Hypol, Vibrathane, Witcoflex	Pode ser rígido ou flexível; excelente resistência à abrasão, impacto e intempéries; boa elasticidade	Espumas, calçados, selantes, amortecedores, enchimentos automotivos, isolantes térmicos	Reciclagem química (hidrólise, glicólise ou pirólise) é mais indicada. A reciclagem mecânica é limitada por deformações estruturais. Pode ser reaproveitado em enchimentos e compósitos. Custo: alto.

Fonte: Adaptado de CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018, p. 1230-1233.

Fonte: Adaptado de CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D.G. Ciência e engenharia de materiais; uma introdução. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018, p. 1230-1233.

O uso permanente dos plásticos é resultado de um conjunto de fatores técnicos, econômicos e culturais que, ao longo do século XX, consolidaram esses materiais como símbolo da industrialização e da conveniência. No entanto a dependência de polímeros sintéticos impõe uma transição inevitável: de uma lógica de volume e substituição para uma lógica de qualidade e circularidade (BUCKNALL, 2020). O entendimento de seus tipos, usos e propriedades não é, portanto, apenas uma questão técnica, mas o ponto de partida para formular políticas e práticas capazes de reconciliar inovação produtiva e responsabilidade ambiental.

3.3.1 Conceitos e definições de polímeros e plásticos

Plásticos e polímeros não são termos equivalentes, embora relacionados. Canevarolo (2010) descreve o polímero como uma macromolécula composta pela repetição de pequenas unidades químicas denominadas monômeros, que se ligam em longas cadeias e formam a base estrutural de materiais de diferentes naturezas. O plástico, por sua vez, resulta da combinação desse polímero com aditivos, pigmentos e cargas, o que lhe confere propriedades moldáveis e resistência adequada às aplicações industriais. Essa distinção, mais do que conceitual, é operacional pois compreender a diferença entre ambos é essencial para definir estratégias de reuso e reciclagem compatíveis com cada tipo de material. Callister e Rethwisch (2018) explicam que cadeias lineares, ramificadas ou em rede apresentam mobilidade distinta, o que se traduz em diferenças de rigidez e de comportamento térmico em etapa de processamento. Shackelford (2014) observa que variações na massa molar e na cristalinidade afetam a resistência mecânica e a temperatura de fusão, o que confirma a importância da estrutura de cadeia para o desempenho final do material. A padronização terminológica tem sido atualizada por organismos científicos, com foco em clareza conceitual e coerência entre pesquisa, normas e ensino. Fellows et al., (2022) sistematiza os termos de polimerização em documento de recomendações elaborado pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), organização científica responsável pela padronização internacional da nomenclatura e da terminologia química. A IUPAC atua desde 1919 na definição de regras universais para identificação de substâncias, classificação de reações e estruturação de vocabulários técnicos utilizados em pesquisa e indústria. No campo dos polímeros, suas recomendações garantem uniformidade terminológica entre laboratórios, normas técnicas e publicações científicas, evitando ambiguidades e interpretações divergentes. Em outro documento da IUPAC, Luscombe et al., (2022) apresenta um guia de termos que facilita o uso padronizado de conceitos básicos. Esse conjunto de definições sustenta a redação deste capítulo, reduzindo confusões entre substância macromolecular e material formulado.

Ao tratar “plástico” como um sistema formulado, a composição passa a incluir estabilizantes, plastificantes, pigmentos e cargas funcionais, que ajustam propriedades de processamento e de uso. Hahladakis (2018) descreve que aditivos ampliam durabilidade e desempenho, mas podem migrar, interferir na reciclagem mecânica e exigir monitoramento de contaminantes em aplicações sensíveis. Ding (2023) discute que decisões de projeto devem antecipar a etapa de reprocessamento, privilegiando formulações simples, paletas controladas de aditivos e combinações compatíveis com as rotas de reciclagem disponíveis. A OECD (2024) propõe requisitos de conteúdo reciclado com mecanismos de verificação e rastreabilidade, de modo a garantir integridade na medição e segurança no reaproveitamento da resina em novos ciclos. A indústria nacional tem incorporado parâmetros de qualidade para resinas secundárias e requisitos de transparência na comprovação de massa. A ABIPLAST (2024) registra a predominância de aplicações em embalagens e o avanço de uso de reciclados quando há padronização de especificações. Rosenboom (2022) analisa que biopolímeros e plásticos de base renovável ampliam alternativas de matéria-prima, mas requerem integração com rotas de reprocessamento e critérios de fim de vida controlado.

A clareza entre “polímero” e “plástico” apoia decisões técnicas em projeto, processamento e reprocessamento. Ragaert (2017) descreve que o desempenho das rotas de revalorização depende de pureza, compatibilidade e manutenção de propriedades, o que demanda composições planejadas para reciclagem. Schyns; Shaver, (2021) enfatiza que a reciclagem mecânica sofre com degradação por múltiplos ciclos térmicos, exigindo controle de temperatura, oxigênio e tempo de residência para preservar a integridade da cadeia. Jung (2023) indica que a combinação de soluções, desde design para reciclagem, melhoria de triagem e estabilização no reprocesso, aumenta o rendimento e abre aplicações de maior valor. Essas definições e recomendações iniciais serão detalhadas nos próximos subtópicos.

3.3.2 Termoplásticos e termofixos: comportamento térmico e possibilidades de reprocessamento

A principal distinção entre termoplásticos e termofixos decorre do modo como as cadeias poliméricas respondem ao calor e da estrutura de ligações na matriz do material. Canevarolo (2010) explica que termoplásticos amolecem ao aquecer e solidificam ao resfriar, permitindo sucessivas remodelagens por fusão sem alteração química substancial, enquanto termofixos formam redes tridimensionais reticuladas após a cura e não fundem novamente. Callister e Rethwisch (2018) observam que, nos termoplásticos, a ausência de ligações cruzadas permanentes facilita o deslizamento de cadeias e a reversibilidade do processamento, desde que respeitadas as faixas de transição vítreia e de fusão. Shackelford (2014) registra que cristalinidade, massa molar e histórico

térmico definem temperaturas de operação e estabilidade dimensional, sendo parâmetros decisivos para processamento e reuso. A reciclagem mecânica de embalagens baseadas em poliolefinas e PET é viável pela natureza reversível do aquecimento, porém sofre degradação acumulada, o que exige estabilização e controle de processo para preservar propriedades. (SCHYNS; SHAVER, 2021)

Entre os termoplásticos de maior volume, PE, PP e PET concentram aplicações em embalagens, filmes e garrafas, com rotas de reciclagem mecânica e, quando necessário, química. Jung (2023) reúne estratégias de melhoria de triagem, compatibilização e processamento para elevar rendimento e qualidade do reciclado, destacando que a integração entre rotas mecânicas e químicas responde a misturas e contaminações. Hahladakis (2018) indica que aditivos e pigmentos influenciam o desempenho térmico e a estabilidade durante o reprocesso, e considera como fator de importância a padronização de formulações para reduzir perdas. Com análise técnica mais aprofundada, Abedsoltan (2023) contribui com a revisão de mecanismos de despolimerização de PET por hidrólise, álcoolise e glicólise, capazes de recuperar monômeros com alto grau de pureza para aplicações mais exigentes. Ghosal (2022) detalha avanços em catalisadores e condições de reação que favorecem a reciclagem química de poliésteres, complementando a rota mecânica quando há degradação ou mistura que compromete a integridade da cadeia. Schyns (2021) ainda afirma que, apesar das limitações, a melhoria de estabilização e de parâmetros de extrusão permite ciclos adicionais sem perdas críticas de desempenho do material. Fechando esse conjunto de observações científicas, a OECD (2024) propõe requisitos de conteúdo reciclado com verificação e rastreabilidade, conectando desempenho técnico a instrumentos de política pública.

Nos termofixos, a presença de ligações cruzadas confere estabilidade térmica e dimensional, mas restringe a fusão e inviabiliza o reprocesso por aquecimento convencional. Morici (2022) apresenta rotas emergentes para recuperar fibras e valor de compósitos, bem como estratégias para projetar termofixos com vínculos dinâmicos que permitam algum grau de reformulação. Krishnakumar (2020) introduz o conceito de *vitrimers*, redes associativas com troca de ligações sob temperatura controlada, possibilitando reparo, soldagem e remodelagem sem perda do arranjo reticulado, também discute as reações dinâmicas em redes adaptáveis covalentes, que aproximam o desempenho de um termofixo reutilizado das facilidades de processo dos termoplásticos.

3.3.3 Codificação de resinas: identificação em campo e em linhas industriais

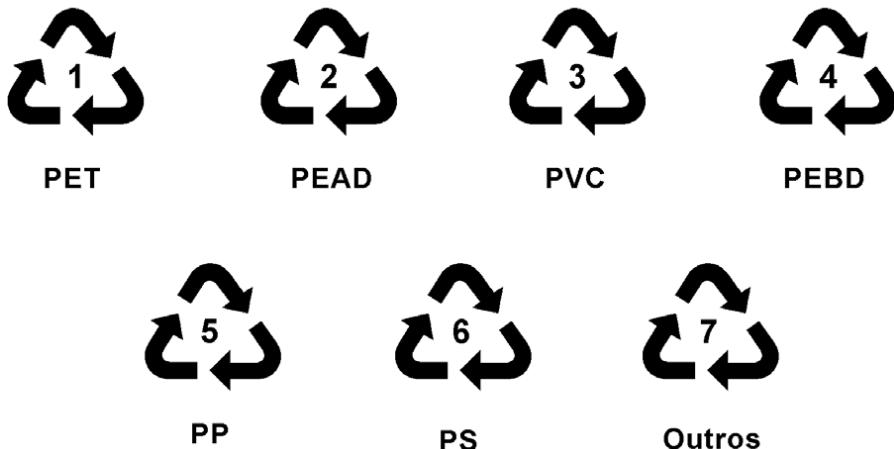
A marcação de peças e embalagens com o código de identificação de resina estabelece uma ligação prática entre o projeto do produto, a triagem e o reprocessamento, pois associa o artigo à família polimérica por meio de um símbolo numérico e de abreviatura gravado no corpo do material.

De acordo com a ASTM International (2020), o Resin Identification Code (RIC) padroniza a codificação das principais resinas em uma matriz de sete classes acompanhadas de siglas técnicas, com aplicação direta na leitura em postos de coleta, centrais de triagem e linhas de conversão. Em revisão de literatura e práticas de padronização, Shamsuyeva; Endres, (2021) diferenciam essa marcação, destacando que o RIC não é atestado de reciclagem, mas um auxiliar de identificação de material voltado a operações de separação e logística. No âmbito da rotulagem genérica, ISO (2016) recomenda um esquema uniforme de abreviações e símbolos para identificação do polímero em artigos plásticos, reforçando a coerência entre fornecedores, transformadores e recicladores. Em análise de governança técnica, National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2023) descreve o código de resina como um elemento que facilita decisões de manuseio e encaminhamento na cadeia de valor, desde a coleta até a preparação de lotes para reprocessamento.

A integração do código de resina aos processos de triagem manual e classificação automatizada contribui para reduzir contaminações entre polímeros e para preservar o desempenho do material após ciclos de reuso. Considerando a avaliação do desempenho de rotas mecânicas, Schyns; Shaver (2021) afirma que a compatibilização intrafamiliar e o respeito ao RIC favorecem a manutenção da massa molar e das propriedades mecânicas em reprocessamentos subsequentes. Quando se trata de tecnologias de separação, Jung (2023) descreve que sensores óticos e espectroscópicos combinados ao uso do código de resina aumentam a precisão de identificação nas etapas de triagem de alto fluxo e reduzem erros de classificação. Em estudo de aplicação prática, Martínez-Hernandez et. al., (2024) demonstra que módulos multiespectrais apoiados por algoritmos de aprendizagem de máquina reconhecem PET, HDPE, PVC, LDPE, PP e PS, e utilizam o RIC como referência na calibração de modelos de classificação em ambientes descentralizados.

Em campo e na fábrica, a leitura do símbolo padronizado de identificação de resinas é a primeira referência para orientar a segregação por classe de material e reduzir a mistura entre polímeros incompatíveis. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008) - NBR 13230:2008 fixa a representação gráfica obrigatória para embalagens e acondicionamentos plásticos, com triângulo de setas entrelaçadas (símbolo de reciclagem), algarismo de 1 a 7 no interior e, abaixo do ícone, a sigla da resina quando aplicável (Figura 6); a própria norma apresenta a figura normativa com a construção do emblema, as proporções e as diretrizes de posição e legibilidade no corpo da embalagem, assegurando leitura clara durante a triagem e rastreabilidade ao longo da cadeia.

Figura 6 – Símbolos de recicabilidade e identificação das embalagens plásticas



Fonte: (ABNT, 2008)

Coltro et al., (2008) reúnem, em uma tabela sintética, os códigos de identificação de resina e exemplos de aplicação e reciclagem utilizado em âmbito nacional. O material organiza os sete símbolos e relaciona, para cada família polimérica, usos típicos em embalagens e destinações de reprocesso mais comuns.

Tabela 1 – Exemplos de aplicação e de reciclagem das resinas plásticas

Resina	Aplicação	Reciclagem
 PET	Garrafas para refrigerante, água, óleo comestível, molho para salada, anti-séptico bucal, xampu	Fibra para carpete, tecido, vassoura, embalagem de produtos de limpeza, acessórios diversos
 PEAD	Garrafas para iogurte, suco, leite, produtos de limpeza, potes para sorvete, frascos para xampu	Frascos para produtos de limpeza, óleo para motor, tubulação de esgoto, conduite
 PVC	Filmes estiráveis, berços para biscoitos, frascos para anti-séptico bucal, xampu, produtos de higiene pessoal, <i>blister</i>	Mangueira para jardim, tubulação de esgoto, cones de tráfego, cabos
 PEBD	Filme encolhível, embalagem flexível para leite, iogurte, saquinhos de compras, frascos <i>squeezable</i>	Envelopes, filmes, sacos, sacos para lixo, tubulação para irrigação
 PP	Potes para margarina, sorvete, tampas, rótulos, copos descartáveis, embalagem para biscoitos, xampu	Caixas e cabos para bateria de carro, vassouras, escovas, funil para óleo, caixas, bandejas
 PS	Copos descartáveis, pratos descartáveis, pote para iogurte, bandejas, embalagem para ovos, acolchoamento	Placas para isolamento térmico, acessórios para escritório, bandejas
 Outros	Embalagem multcamada para biscoitos e salgadinhos, mamadeiras, CD, DVD, utilidades domésticas	Madeira plástica, reciclagem energética

Fonte: (COLTRO et al., 2008; p.121)

O princípio de identificar “famílias de resina” por numerais e abreviaturas é igualmente contemplado por práticas correlatas como a ASTM D7611, também utilizada para codificar artigos plásticos e manter a consistência do código em linhas de produção e de recuperação (ASTM, 2023). Ressalta-se que os números e abreviaturas utilizadas no padrão ASTM D7611 são os mesmos figurados na NBR 13.230:2008. O pictograma normativo é um índice de composição, não um atestado de reciclagem, de modo que sua função primária é permitir reconhecimento rápido do polímero e favorecer a logística de separação, cabendo aos processos e às condições locais a determinação da viabilidade de reciclagem (SHAMSUYEVA; ENDRES, 2021). No contexto brasileiro, a adoção sistemática da marcação prescrita pela NBR 13230 vem acompanhada por orientações setoriais para uso coerente de códigos e treinamento de operadores, meta que se articula a requisitos de pureza de lote e de comprovação de conteúdo reciclado ao longo do fluxo de valorização (ABIPLAST, 2024).

A presença de materiais multicamadas ou com misturas de resinas demanda cuidados adicionais, pois a marcação pelo RIC reflete o polímero predominante e não substitui a verificação da composição interna. Em revisão sobre filmes multicamadas, Soares et al., (2022) destaca que composições complexas, embora eficazes do ponto de vista de barreira, complicam a separação quando o aparato disponível é majoritariamente baseado em rotas mecânicas. Em proposta de recuperação por via de solvente, Walker et al.,(2020) demonstra a separação de estruturas multicamadas de embalagens via precipitação seletiva, recuperando polímeros em níveis de pureza compatíveis com recirculação em aplicações de maior valor. Em levantamento de instrumentação analítica aplicável à triagem, Neo et al. (2022) compila o uso de FTIR, Raman e LIBS como camadas de confirmação quando a marcação por resina é insuficiente para distinguir misturas, cargas e aditivos. O FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) é uma técnica que identifica materiais analisando como eles absorvem radiação infravermelha. Cada tipo de ligação química nas moléculas do plástico tem um padrão único de absorção de IR formando um espectro característico. Assim, ao captar esse espectro, é possível determinar qual é o polímero presente na amostra. (NEO ET AL.; 2022). A técnica de Raman Spectroscopy (Espectroscopia de Raman) também consiste em identificar materiais por meio de interação com luz. Neo et al., (2022) explicam que quando uma luz de laser é direcionada à amostra, ela sofre uma mudança de energia ao interagir com as ligações químicas. Essa mudança gera um espectro que mostra informações sobre a estrutura molecular do plástico. O Raman é útil para distinguir diferentes tipos de polímeros, principalmente quando há cores ou cargas diferentes na amostra analisadas e por fim: o LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) usa um laser de alta energia que é focado na amostra para criar um plasma, uma espécie de fogo invisível que aquece e transforma as partículas do material em íons e átomos excitados. Ao analisar a luz emitida pelo plasma,

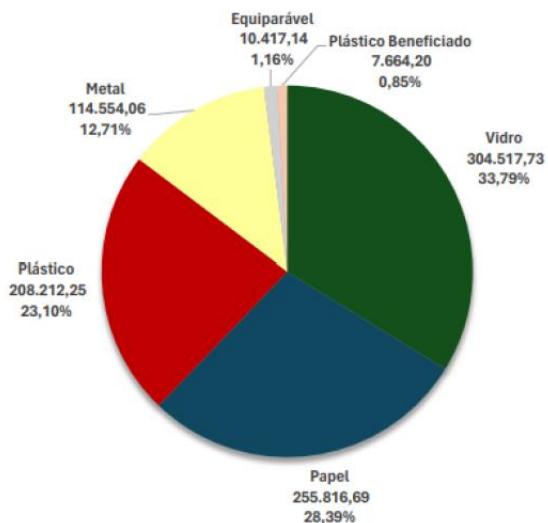
pode-se determinar a composição elementar do plástico, incluindo metais ou aditivos presentes. O LIBS é rápido e capaz também de detectar contaminantes metálicos, mas não fornece informações detalhadas sobre as ligações químicas (estrutura molecular) (NEO ET AL., 2022).

A adoção consistente do código de resina, apoiada por normas de marcação e por ferramentas de verificação em linha, constitui uma base concreta para rotas de valorização mais previsíveis. Em síntese aplicada, Shamsuyeva; Endres, (2021) ressaltam que a clareza da codificação e o alinhamento com práticas de triagem e de projeto favorecem lotes mais homogêneos e menor perda por contaminação. Em resultados de caso, Martínez-Hernandez et. al., (2024) demonstra ganhos expressivos de acurácia de identificação quando a leitura de códigos é combinada a sinais espectroscópicos, sobretudo em instalações descentralizadas. Com esse enquadramento, segue-se para a caracterização das famílias de resinas mais incidentes no pós-consumo e para a tradução operacional dessas marcações em rotinas de segregação e janelas de processamento compatíveis com as principais linhas de reprocessamento.

3.3.4 Tipos de resinas mais frequentes no pós-consumo

No conjunto brasileiro de recuperação de embalagens em 2023, a massa total registrada atingiu 901.182 toneladas, com plástico respondendo por 23% dessa fração, além de vidro (34%), papel (28%), metal (13%) e outros (2%); os dados foram consolidados no âmbito da logística reversa e divulgados pelo governo federal em 2024 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA, 2024).

Figura 7 – Resultados de Logística reversa de embalagens em 2023



Fonte: (MMA, 2024; p.11)

Em paralelo, o estudo setorial da indústria aponta 1,451 milhão de toneladas de resíduos plásticos consumidos na reciclagem no país em 2023, dos quais 984 mil toneladas são embalagens e 467 mil toneladas provêm de pós-industrial, resultando em 939 mil toneladas de resina reciclada pós-consumo (PCR) (ABIPLAST, 2024). As embalagens rígidas representam 47% e as flexíveis 21% do total reciclado, o que reflete a importância de frascos, sopros, potes, filmes e sacos nos fluxos urbanos e empresariais (ABIPLAST, 2024).

Figura 8 – Consumo de resíduos na reciclagem por tipo de artigo plástico

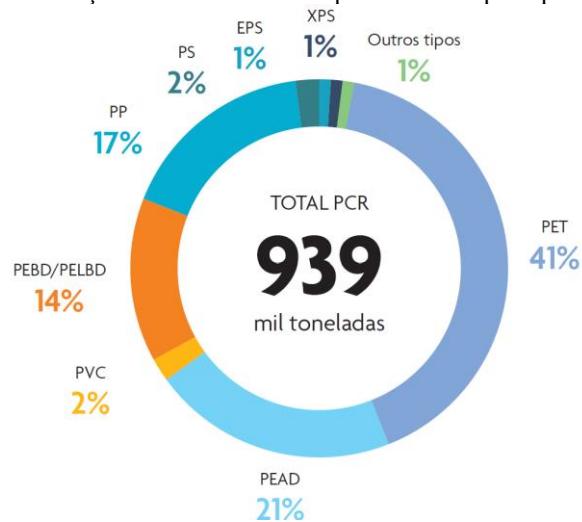


Fonte: (ABIPLAST, 2024; p.2)

Ainda no plano nacional, dos 80,96 milhões de toneladas em 2023, apenas 8,3% do total foi efetivamente reciclado, indicador que reforça a necessidade de triagem qualificada e especificações por polímero para ampliar a produção de PCR com qualidade (ABRELPE, 2024). Para fins de contextualização global, as projeções de longo prazo sugerem aumento do volume de resíduos plásticos com crescimento de reciclagem em participação percentual, o que coloca em evidência a importância de dados nacionais para orientar metas factíveis de revalorização dos materiais (OECD, 2022).

A composição de PCR por polímero mostra participação majoritária de poliolefinas e PET, coerente com o perfil de embalagens pós-consumo recuperadas. O estudo setorial divulga que, na produção nacional de PCR, PET representa 41%, PEAD 21%, PP 17%, PEBD/PELBD 14%, e o agrupamento outros completa o total com 7%, sinalizando as janelas de processamento mais recorrentes no país (ABIPLAST, 2024).

Figura 9 – Produção de resina reciclada pós-consumo por tipo de plástico



Fonte: (ABIPLAST, 2024; p.4)

A massa total gerada e a taxa nacional de reciclagem consolidadas no Panorama 2024 dão lastro para situar o peso das embalagens plásticas dentro do conjunto dos materiais e para dimensionar o esforço de triagem, coleta dedicada e reprocesso. Os números apresentados demonstram, portanto, que PET, PEAD, PEBD/PELBD e PP concentram a maior parte do volume reciclado no país, enquanto PVC e PS aparecem com menor incidência no volume gerado PCR (ABIPLAST, 2024).

Ao reunir os dados oficiais e setoriais apresentados, a caracterização dos tipos de resinas mais incidentes no pós-consumo no Brasil mostra um contexto coerente entre oferta de materiais, desempenho operacional das rotas de reaproveitamento e exigências de padronização para manter qualidade de resina reciclada pós-consumo. A discussão que será construída a seguir sobre tipos de reciclagem, decorre diretamente do diagnóstico apresentado sobre PCR, pois a distribuição por resinas determina os caminhos tecnocientíficos disponíveis e os critérios de decisão que hierarquizam, na prática, modelos de rotas mais adequados a cada tipo de material.

3.4 TIPOS E ROTAS DE RECICLAGEM EM ARRANJOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS

Nas iniciativas de reaproveitamento de resíduos plásticos, interessa mapear de forma objetiva quais rotas de reciclagem podem ser implementadas por cooperativas, pequenas recicadoras e arranjos locais de economia circular, com ênfase em processos estáveis, janelas operacionais conhecidas e integração a mercados que absorvam o material reprocessado. Vollmer et al. (2020) descreve que portfólios de soluções combinam rotas físicas e químicas, entendidas como complementares quando o objetivo é elevar a fração recuperada com qualidade adequada ao uso. Solis e Silveira (2020) distinguem grupos tecnológicos por sensibilidade à contaminação e por grau de quebra molecular, aspecto que orienta o destino do material em aplicações de menor ou maior

exigência. Korley et al., (2021) argumenta que estratégias de *upcycling* acompanham essa lógica ao priorizar ganhos de valor sem exigir, necessariamente, rotas intensivas em insumos ou energia quando o objetivo é reintroduzir polímeros comuns em cadeias de consumo. Roosen et al. (2020) registra que a heterogeneidade dos fluxos impõe limites à padronização e, por consequência, recomenda triagem e pré-tratamentos que condicionem o desempenho do reprocesso. A Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD, indica que alterações regulatórias globais na movimentação transfronteiriça de sucata plástica afetam a disponibilidade local de insumos e reforçam a necessidade de sistemas domésticos de coleta e reciclagem articulados ao mercado (OECD, 2024). O United Nations Environment Programme, UNEP, sintetiza que a combinação de redução de usos problemáticos, crescimento de reuso e reciclagem, e redirecionamento de modelos de negócio favorece a implantação de soluções locais economicamente viáveis quando as rotas são alinhadas à demanda regional (UNEP, 2023).

Para que pequenas operações estabeleçam rotinas consistentes, a literatura recente enfatiza critérios de qualidade do insumo, desenho de produto para recicabilidade e requisitos sanitários quando o destino envolve contato com alimentos. Mager e Fischer (2023) demonstra que a composição do fluxo de entrada influencia diretamente a qualidade do reciclado de poliolefinas para embalagens rígidas, o que sugere triagem dirigida e controle de contaminantes na origem. A European Food Safety Authority, EFSA, formaliza parâmetros de avaliação para processos de reciclagem de politereftalato de etileno, PET, voltados a contato com alimentos, com foco na capacidade de descontaminação e na rastreabilidade do processo, exigências que afetam a elegibilidade de lotes reprocessados (EFSA, 2024). A Association of Plastic Recyclers, APR, orienta o desenho de embalagens compatíveis com as rotas predominantes, incluindo diretrizes sobre rótulos, adesivos e combinações de materiais que favoreçam a separação e o reprocesso, ponto que coopera com a previsibilidade das operações de pequena escala (APR, 2022). Joseph et al. (2024) revisa as opções de reprocessamento de PET e reforça a relação entre especificações de processo, aplicação final e requisitos regulatórios. Xu et al. (2023) examina separação por solventes em filmes multicamadas e quantifica benefícios ambientais quando a rota mecânica não consegue manter a funcionalidade desejada, o que amplia alternativas para fluxos complexos. Dokl et al., (2024) discute caminhos catalíticos aplicáveis a poliolefinas e destaca que a escolha por abordagens de baixa complexidade depende da qualidade do insumo disponível e da meta de desempenho do produto reprocessado.

Quando o objetivo é organizar cadeias locais de valorização, decisões sobre a rota dependem da compatibilidade entre o fluxo de resíduos, a capacidade instalada e o mercado comprador. Rotas termoquímicas podem atender parcelas do fluxo quando há especificação de pré-tratamento e de

pureza, ao passo que a reciclagem mecânica permanece estratégica para poliolefinas e PET se o abastecimento garante homogeneidade de lote (KUSENBERG, 2022). A OECD documenta que mudanças nas dinâmicas de comércio de sucata plástica reorientam a disponibilidade de materiais e reforçam a importância de redes regionais de triagem e reprocesso com especificações alinhadas ao consumidor industrial (OECD, 2023). O Consumer Goods Forum, por meio das Golden Design Rules, sugere ajustes de concepção de embalagens que facilitam a triagem e a reintrodução do material em aplicações de maior valor, diretriz que dialoga com redes locais de suprimento (CGF, 2022). Nordahl et al., (2023) quantifica que combinações de rotas, mecânica e solvente, podem reduzir emissões e ampliar o espectro de aplicações quando o desenho do sistema prioriza o melhor encaixe entre fluxo, processo e destino. Dokl et al., (2024) projeta que a demanda por resinas e o acúmulo de resíduos tendem a crescer nas próximas décadas, o que sugere planejamento de portfólios regionais de soluções com metas progressivas de qualidade de reciclado. Zhao et al., (2024) acrescenta que avanços catalíticos ampliam o cardápio tecnológico, mas a adoção prática depende de simplicidade operacional e de acesso a insumos e reagentes, fatores que pesam para cooperativas e pequenas plantas.

3.4.1 Principais Tipos de Reciclagem

3.4.1.1 Reciclagem primária

A reciclagem primária é caracterizada pela reintrodução direta do material plástico no mesmo ciclo produtivo, mantendo as propriedades originais e sem alterações estruturais perceptíveis. Segundo Xu (2025), esse processo é geralmente aplicado a resíduos industriais limpos e homogêneos, provenientes de sobras de produção, aparas e refugos não contaminados, o que assegura previsibilidade no desempenho do material. Para Nordahl (2023), trata-se da rota mais simples e de menor custo, pois não requer etapas complexas de descontaminação ou reprocessamento químico, embora sua aplicação se restrinja a ambientes industriais controlados. Kusenberg et al. (2022) explica que a reciclagem primária está concentrada em setores como o de injeção de peças e filmes industriais, onde o reaproveitamento imediato reduz desperdícios e custos de matéria-prima. Vollmer (2020) acrescenta que, quando bem estruturada, essa prática contribui para a sustentabilidade corporativa, pois fecha pequenos ciclos de reuso sem comprometer a qualidade. Em operações de pequena escala, cooperativas e recicladores raramente têm acesso a fluxos de resíduos industriais limpos, o que limita a aplicabilidade desse tipo de reciclagem fora do ambiente fabril. Roosen (2020) lembra, contudo, que parcerias entre empresas e cooperativas podem permitir que excedentes industriais sejam destinados a unidades locais, criando um elo entre reciclagem primária e responsabilidade social. A Association

of Plastic Recyclers, APR (2022), reforça que manter rastreabilidade e controle de contaminação é condição essencial para preservar as propriedades dos materiais reaproveitados nessa rota.

3.4.1.2 Reciclagem secundária

A reciclagem secundária, também conhecida como mecânica, é a mais difundida no Brasil e representa a principal estratégia para o reaproveitamento de resíduos plásticos pós-consumo. Segundo Joseph (2024), esse processo envolve triagem, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento em extrusoras, resultando em grânulos que podem ser utilizados na fabricação de novos produtos. Roosen (2020) observa que, embora o processo seja tecnicamente consolidado, a variabilidade do insumo é o principal desafio, exigindo triagem eficiente e controle de impurezas. A ABIPET (2024) destaca que o politereftalato de etileno, PET, poli (tereftalato de etileno), é o polímero mais reciclado mecanicamente no país, com cadeias estruturadas que alimentam aplicações como têxteis, embalagens e fibras industriais. Para Mager (2023), a qualidade do reciclado depende do tipo de polímero e do histórico de uso, sendo mais previsível em poliolefinas e PET do que em plásticos multicamadas. Nordahl (2023) explica que, quando as cooperativas conseguem fornecer materiais de pureza conhecida, há ganho em produtividade e redução de custos de processamento. A OECD (2024) indica que a reciclagem mecânica deve ser acompanhada de design para reciclabilidade, evitando combinações de polímeros e pigmentos que dificultam o reprocesso. Em contexto prático, pequenas recicadoras brasileiras têm obtido resultados consistentes com a reciclagem de embalagens rígidas de PEAD e PP, enquanto as flexíveis e multicamadas ainda enfrentam barreiras operacionais e comerciais, observação confirmada por Yugue (2020) ao mapear experiências nacionais e estrangeiras no reaproveitamento de filmes. De forma geral, a reciclagem secundária é o eixo mais acessível e consolidado, representando o alicerce das operações locais de economia circular.

3.4.1.3 Reciclagem terciária e quaternária

A reciclagem terciária compreende processos que convertem o material plástico em compostos químicos ou combustíveis, recuperando o valor energético ou molecular do resíduo. Segundo Solis e Silveira (2020), as rotas químicas, como pirólise e solvólise, têm avançado em países industrializados, mas sua aplicação ainda é limitada no Brasil devido ao custo de implantação e à necessidade de controle de emissões. Xu (2025) descreve que os processos baseados em solventes e despolimerização são mais promissores para fluxos homogêneos, como PET e poliamidas, em função da previsibilidade do produto obtido. Zhao (2024) observa que tecnologias catalíticas emergentes vêm tornando o processo mais eficiente em condições brandas, reduzindo o consumo energético. Kusenberg et al.

(2022) acrescenta que a integração de óleos de pirólise com refinarias pode expandir a escala industrial, desde que sejam observados parâmetros de pureza do óleo e de resíduos. Para Dokl et al. (2024), a reciclagem química deve ser entendida como rota complementar, e não substitutiva, à mecânica, uma vez que atende frações mistas e de baixo valor. A reciclagem quaternária, ou energética, representa a recuperação de energia por combustão controlada, com aproveitamento térmico ou elétrico, e pode ser útil para rejeitos não recicláveis mecanicamente. Nordahl (2023) discute que a valorização energética, quando bem regulada, reduz o envio de resíduos a aterros e complementa estratégias de circularidade. Em países europeus, a OECD (2023) aponta que essa rota é usada como alternativa de último recurso, respeitando a hierarquia da gestão de resíduos. No contexto brasileiro, autores como Sanjad (2018) e Piaia (2023) sugerem que plantas de coprocessamento e produção de combustíveis derivados de resíduos podem ser integradas a políticas municipais de reciclagem, desde que sejam mantidos controles ambientais e metas progressivas de reciclagem material. Assim, a reciclagem terciária e quaternária amplia o espectro de soluções, permitindo que resíduos antes classificados como rejeitos passem a integrar fluxos produtivos, completando o ciclo da circularidade.

3.4.2 Contribuições para gestão de resíduos recicláveis a partir de Estudos de caso identificados no Brasil

Em continuidade aos fundamentos expostos sobre economia circular, identificação de polímeros e rotas de reciclagem, o foco desloca-se para experiências brasileiras de gestão local de recicláveis, com ênfase em resultados mensuráveis e arranjos institucionais como exemplos para a gestão de resíduos plásticos. Os achados foram consolidados ao final dessa sessão no quadro 3, contemplando os principais resultados e suas principais contribuições. Segundo Dornelas e Guimarães (2023), o planejamento municipal de resíduos revela como capacidades operacionais e desenho de políticas públicas condicionam a organização de fluxos de materiais. Azevedo et al., (2022) apontam que a articulação entre poder público e organizações de catadores modifica rotinas de coleta e triagem, com reflexos sobre volumes recuperados e condições de trabalho. Lima et al. (2023) analisa fatores que influenciam a adesão domiciliar à coleta seletiva e destacam variáveis socioeconômicas e de informação como determinantes de participação. Fialho et al. (2023) registram que estratégias de comunicação e presença digital sistemática de associações ampliam alcance de campanhas e visibilidade de serviços. Ferreira (2024) discute a inserção dos catadores em decisões socioambientais e explicita efeitos institucionais dessa inclusão em processos de governança municipal. Guabiroba (2023) propõem indicadores para orientar a integração entre coleta seletiva e centrais locais de triagem, com vistas a qualificar o desempenho dos sistemas.

No recorte de Uberlândia, Minas Gerais, o objetivo do estudo de Dornelas e Guimarães (2023) consistiu em avaliar a trajetória da política municipal e o arranjo de atores, com análise documental e entrevistas semiestruturadas. Conforme os autores, a rede local contava com cinco associações e uma cooperativa vinculadas ao serviço público, informação registrada no período de referência, o que evidencia capilaridade organizacional, embora com assimetrias operacionais (DORNELAS; GUIMARÃES, 2023, p. 5). Em Minas Gerais, Carvalho (2024) realizaram estudo de caso em cooperativa, adotando questionários e série histórica gravimétrica, e descrevem necessidade de ajustes em triagem e destinação final como parte de um ciclo de melhoria incremental. Em escolas de Cruz das Almas, Bahia, Oliveira et al. (2024) relataram implantação de rotinas de segregação e sensibilização, com estruturação de um programa educativo que envolveu docentes, discentes e equipe de apoio. Em Eunápolis, Bahia, Fialho et al. (2023) descreveram estratégia comunicacional continuada de uma associação, combinando redes sociais e ações educativas para fidelização de doadores e clientes de recicláveis. Na perspectiva da adesão cidadã, Lima et al. (2023) sustentam que a percepção de utilidade da coleta seletiva e a regularidade do serviço constituem condicionantes para o engajamento domiciliar.

O caso de João Pessoa, Paraíba, foi conduzido por Sá et al. (2023) com o objetivo de medir a sustentabilidade do programa municipal de coleta seletiva, por meio de matriz de indicadores nas dimensões operacional, econômica, social, política e ambiental. Os autores estruturaram parâmetros aplicáveis à rotina de gestão, com possibilidade de comparação temporal e entre localidades (SÁ, 2023). Em paralelo, pesquisa de alcance regional sobre coleta seletiva identificou 850 entrevistas válidas, o que permitiu estimar padrões de participação social e barreiras informacionais na cidade de Uberaba, Minas Gerais, dado relatado no corpo do artigo e utilizado para apoiar decisões sobre a importância comunicação pública (LIMA, 2023). Na interpretação institucional, Ferreira (2024) analisa uma década de decisões e mecanismos de participação, com ênfase na presença de catadores em conselhos e audiências. No eixo de planejamento de sistemas, Guabiroba et al. (2023) detalham um método para dimensionar rotas de coleta seletiva e centrais de triagem locais, articulando metas operacionais e indicadores de desempenho. Em termos de governança de fluxos, Azevedo et al. (2022) examinam como pactuações com organizações de catadores alteram as regras de coordenação e viabilizam contratos com metas e prestação de contas. Em experiências educacionais aplicadas, Oliveira et al. (2024) relatam que a participação de gestores escolares e a formalização de rotinas de segregação constituem elementos práticos para estabilizar resultados.

Resultados em cooperativas apontam para ganhos operacionais quando há diagnóstico periódico e retroalimentação das práticas envolvendo processos de estruturação, treinamento,

cuidados com a saúde ocupacional entre outros aspectos. Carvalho et al. (2025) descrevem, em cooperativa mineira, uso de dados de composição gravimétrica e de percepção dos cooperados para reordenar etapas de triagem e estocagem. Em termos de saúde ocupacional, Mendes et al., (2024) reportam um programa de exercícios laborais em cooperativa com delineamento descritivo, adotado para mitigar queixas musculoesqueléticas em jornada de triagem. Na escala municipal, Fialho et al. (2023) registram que a continuidade de campanhas educativas e a prestação de contas públicas sustentam engajamento de parceiros e fornecem previsibilidade de abastecimento de materiais. Em termos de adesão domiciliar, Lima et al. (2023) enfatizam que comunicação clara sobre dias de coleta e instruções de separação correlaciona com menores taxas de contaminação. Em políticas de inclusão, Ferreira (2024) delimita mecanismos institucionais que aproximam cooperativas de instâncias decisórias, aspecto que repercute sobre contratos e repasses.

Experiências com integração de indicadores ao planejamento mostram potencial para qualificar decisões e ampliar previsibilidade de fluxo. Guabiroba et al. (2023) apresentam um procedimento para planejar coleta seletiva e centrais de triagem com base em metas de desempenho local, com atenção a distâncias, capacidade instalada e custo por tonelada. Azevedo et al. (2022) discutem que a formalização de parcerias com organizações de catadores modifica incentivos para investimentos em equipamentos e capacitação. Dornelas e Guimarães (2023) indicam que mapeamentos de atores e contratos municipais permitem identificar gargalos e sobreposições institucionais. Em estudos de escolas, Oliveira et al. (2024) descrevem a institucionalização de práticas de segregação como via para consolidar hábitos e reduzir contaminação de fluxo. Em investigações regionalizadas, Lima et al. (2023) observam que fatores de renda e escolaridade influenciam a adesão e devem orientar políticas de comunicação. Na abordagem de saúde e produtividade, Mendes et al. (2024) explicam que a ergonomia e a organização do trabalho impactam continuidade de operações e qualidade do material recuperado.

A seguir, o Quadro 3 sintetiza os estudos apresentados que abordam práticas e resultados relacionados à gestão de resíduos recicláveis sob diferentes perspectivas institucionais, educacionais e operacionais. Os casos mostram como políticas locais, programas de educação ambiental, ações de comunicação e indicadores de sustentabilidade contribuem para aprimorar a eficiência e a governança dos sistemas de coleta seletiva. Essa sistematização permite observar experiências aplicáveis que podem ser adaptadas à realidade municipal e comunitária, abrangendo desde metodologias de avaliação e capacitação até iniciativas de inclusão social e saúde ocupacional em cooperativas. Os resultados oferecem parâmetros para o planejamento e aprimoramento de projetos de reciclagem em escala local.

Quadro 3 – Análise bibliométrica: Síntese dos estudos de casos brasileiros sobre gestão de resíduos e suas contribuições.

Quadro 3 - Análise bibliométrica: Síntese dos estudos de caso brasileiros sobre gestão de resíduos recicláveis e suas contribuições

Autor, ano	Título do trabalho	Objetivo do trabalho	Resumo	Local e atores envolvidos	Metodologia utilizada	Resultados	Contribuições para a gestão de resíduos plásticos
Dornelas e Guimaraes, 2023	<i>Resíduos sólidos urbanos em Uberlândia-MG: análise temporal</i>	Avaliar a trajetória da política municipal de resíduos sólidos e identificar o arranjo institucional que sustenta a coleta seletiva.	Analisa a evolução da gestão de resíduos e a articulação entre governo local e cooperativas de catadores.	Uberlândia (MG); cinco associações e uma cooperativa vinculadas à prefeitura.	Análise documental e entrevistas com gestores e lideranças comunitárias.	O município possui seis organizações parceiras; observou-se aumento linear na coleta seletiva e picos sazonais em julho e dezembro.	Demuestra como diagnósticos temporais e institucionais apoiam o planejamento de rotas e contratos de triagem.
Azevedo et al., 2022	<i>Impactos da Covid-19 sobre catadores de materiais recicláveis organizados no Estado de São Paulo</i>	Identificar os efeitos da pandemia sobre as condições de trabalho e renda das organizações de catadores.	Analisa implicações da crise sanitária sobre a formalização e continuidade das atividades de coleta seletiva.	Estado de São Paulo; 549 organizações de catadores e governos municipais.	Levantamento documental, dados setoriais (CEMPRE, ANCAT) e questionários.	33,88 % das organizações tinham contratos formais; 86,71 % dos trabalhadores ganhavam entre 0,5 e 2 salários mínimos.	Evidencia a importância de apoio público e formalização contratual para resiliência e estabilidade dos fluxos de recicláveis.
Lima et al., 2023	<i>Coleta seletiva: fatores norteadores do processo a partir de um estudo de caso em cidade de médio porte em Minas Gerais</i>	Investigar fatores socioeconômicos e informacionais que influenciam a adesão da população à coleta seletiva.	Discute a influência de renda, escolaridade e percepção ambiental sobre a participação cidadã.	Uberaba (MG); 850 moradores entrevistados.	Questionário estruturado, tratamento estatístico (SPSS) e análise descritiva de frequências.	61,88 % dos entrevistados eram mulheres; 52,35 % tinham mais de 50 anos; 72,83 % ensino médio; renda média de até dois salários mínimos.	Fornecere base empírica para segmentar campanhas e adaptar estratégias de comunicação ambiental à realidade local.
Fialho et al., 2023	<i>Informação ambiental para o desenvolvimento sustentável: coleta seletiva solidária de materiais recicláveis pela Associação Gota do Óleo, Eunápolis-BA</i>	Descrever como estratégias de informação ambiental e comunicação digital contribuem para a coleta seletiva solidária.	Estuda uma associação baiana e sua atuação em educação ambiental e divulgação.	Eunápolis (BA); Associação Gota do Óleo, escolas, empresas e moradores.	Estudo de caso qualitativo, entrevistas e análise de mídias sociais.	2.873 seguidores no Instagram; 940 postagens; 70 famílias cadastradas; ações em sete escolas.	Demuestra como o uso de mídias digitais e parcerias educacionais pode aumentar a captação e fidelização de doadores de recicláveis.
Ferreira, 2024	<i>Waste pickers and their inclusion in Brazilian public environmental decisions</i>	Analizar a participação de catadores em conselhos e audiências públicas ambientais e seus efeitos institucionais.	Examina processos de deliberação e inclusão de catadores em políticas ambientais.	Municípios brasileiros; conselhos ambientais e organizações de catadores.	Estudo documental e análise de atas e resoluções de conselhos (2010–2020).	62 % dos conselhos analisados incluíram catadores; 42 % deliberaram sobre resíduos.	Mostra como a inclusão formal de catadores fortalece a governança ambiental e a legitimidade das decisões públicas.
Guabirola et al., 2023	<i>Sustainability indicators applied to a local strategy context</i>	Propor e testar um modelo de indicadores de sustentabilidade para sistemas municipais de coleta seletiva.	Define métricas para mensurar o desempenho técnico e social da coleta seletiva.	Município brasileiro de médio porte; universidades e prefeitura.	Construção e aplicação de 16 indicadores de sustentabilidade.	Grau geral de sustentabilidade 4,6 (escala 0–10); taxa de recuperação 5,44 %; custo operacional médio R\$ 320/toneada.	Disponibiliza ferramenta de gestão por indicadores para aprimorar eficiência e qualidade da triagem.
Carvalho et al., 2024	<i>Desafios e perspectivas do processo de triagem e destinação de resíduos domiciliares</i>	Diagnosticar gargalos e propor melhorias em processos de triagem e destinação de uma cooperativa mineira.	Analisa organização operacional e práticas de trabalho em triagem.	Minas Gerais; cooperativa de catadores e gestão municipal.	Estudo de caso, levantamento gravimétrico e aplicação de questionários.	969 565 kg coletados em 2020; 527 632 kg entre jan.–jul. 2021; aumento de 8 % na produtividade média.	Oferece evidências de como dados quantitativos podem orientar reorganização logística e ganhos de eficiência.
Oliveira et al., 2024	<i>Estudo comparativo sobre a geração de resíduos sólidos e implantação da coleta seletiva em escolas públicas e privadas</i>	Avaliar resultados de um programa de educação ambiental sobre segregação de resíduos.	Compara geração de resíduos em escolas antes e depois da implementação da coleta seletiva.	Cruz das Almas (BA); duas escolas públicas e uma privada.	Análise gravimétrica e abordagem comparativa antes/depois do programa.	Redução de 14 % nos rejeitos; aumento de 8 % nos recicláveis e 6 % nos orgânicos.	Demuestra impactos mensuráveis da educação ambiental sobre separação e qualidade dos materiais recicláveis.
Sá, 2023	<i>Indicadores de sustentabilidade para avaliação de programas de coleta seletiva</i>	Medir a sustentabilidade do programa municipal de coleta seletiva e criar instrumento de avaliação.	Avalia a eficiência do programa de João Pessoa a partir de cinco dimensões de sustentabilidade.	João Pessoa (PB); prefeitura, secretaria de serviços urbanos e pesquisadores.	Aplicação de matriz de indicadores e entrevistas com gestores.	Grau de sustentabilidade 4,6 (escala 0–10); taxa de recuperação 5,44 %; renda média dos catadores R\$ 1.115,30.	Fornecere diagnóstico quantitativo e replicável para orientar planejamento municipal e metas por material.
Mendes et al., 2024	<i>Exercise program for workers of a cooperative of recycling, case report</i>	Relatar a implantação de um programa de exercícios laborais em cooperativa de reciclagem.	Relata intervenção de saúde ocupacional voltada a ergonomia e produtividade.	Cooperativa urbana de triagem; 20 trabalhadores.	Estudo descritivo, aplicação de rotina laboral e registro de sintomas antes e depois.	Redução de 36 % das queixas musculoesqueléticas e aumento de 25 % na produção média.	Relaciona saúde ocupacional e produtividade como fatores de melhoria na qualidade e estabilidade do reprocesso.

Fonte: Elaborado pelo autor

Fonte: Elaborado pelo autor.

As experiências analisadas demonstram que a efetividade de sistemas de reciclagem depende de práticas integradas que combinem educação ambiental, comunicação social e fortalecimento organizacional das cooperativas. A inclusão de escolas, universidades, cooperativas, setor público, empresas e outros agentes locais amplia a legitimidade das ações e cria oportunidades de formação e inovação contínua. Políticas locais de resíduos tornam-se mais sustentáveis quando apoiadas por instrumentos de monitoramento e por redes intersetoriais que envolvem governo, setor privado e sociedade civil. O alinhamento entre capacitação técnica, participação comunitária e coordenação institucional estabelece bases sólidas para modelos locais de gestão voltados à valorização de materiais plásticos recicláveis.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os fundamentos teóricos e técnicos discutidos ao longo deste artigo confirmam que para qualquer implantação de processos de gestão de resíduos plásticos existe a demanda progressiva de substituição do modelo linear por práticas estruturadas sob a lógica da economia circular. Murray, Skene e Haynes (2017) argumentam que a linearidade do atual sistema produtivo, sustentada na extração, consumo e descarte, é incompatível com a continuidade ecológica e econômica. Essa limitação é reforçada pelos dados da OECD (2022), que projetam a triplicação da geração global de resíduos plásticos até 2060 caso as atuais práticas persistam. Relatórios da Ellen MacArthur Foundation (2017) e da Comissão Europeia (2014) demonstram que a circularidade vai além da reciclagem, propondo a regeneração dos materiais por meio de reuso, redesign e reintrodução em ciclos produtivos fechados. A ABRELPE (2024) e a ABIPLAST (2024) convergem nesse diagnóstico ao apontar que a fragilidade das políticas públicas e a falta de integração entre agentes reduzem a capacidade de recuperação e revalorização de materiais. Em perspectiva técnica, Callister e Rethwisch (2018) explicam que o domínio sobre as propriedades estruturais dos polímeros e o controle de suas rotas de reaproveitamento são condições básicas para garantir estabilidade física e desempenho durante o reprocesso, o que conecta conhecimento científico e planejamento operacional.

A análise das rotas de reciclagem expõe a diversidade de soluções disponíveis e a necessidade de combiná-las em portfólios complementares. Ragaert, Delva e Van Geem (2017) ressaltam que o desempenho do reprocessamento depende diretamente da pureza dos fluxos e da manutenção das propriedades físico-químicas do material, o que reforça a relevância de triagem eficiente e padronização de insumos. Vollmer et al. (2020) e Solis e Silveira (2020) apontam que o avanço tecnológico de rotas químicas, como pirólise e solvólise, amplia o espectro de recuperação quando a reciclagem mecânica é inviável, mas ainda enfrenta barreiras de custo e escala. Kusenberg et al. (2022)

e Xu (2025) complementam que a integração entre rotas mecânicas e químicas pode aumentar a recuperação total, desde que observados os limites de pureza e a rastreabilidade das resinas. A OECD (2024) e a EFSA (2024) definem requisitos de rastreabilidade, verificação e segurança em processos destinados a contato com alimentos, demonstrando que a governança técnica é parte integrante da circularidade. Monteiro (2018) e Hahladakis et al. (2018) observam que a reciclagem química no Brasil ainda carece de incentivos e infraestrutura, mas possui potencial estratégico para lidar com fluxos heterogêneos e plásticos de baixa reciclagem mecânica. Assim, a integração tecnológica e institucional descrita pelos autores citados estabelece o alicerce conceitual e prático para sistemas híbridos de reciclagem, adequados à complexidade dos resíduos contemporâneos.

Todas as evidências reunidas confirmam que a construção de arranjos locais de gestão de resíduos plásticos exige uma abordagem intersetorial, ancorada em conhecimento técnico e em inclusão social. Os estudos de Rodrigues et al. (2020) e de Dornelas e Guimarães (2023) demonstram que a integração entre prefeituras e cooperativas fortalece a eficiência operacional e amplia a legitimidade das ações. Fialho et al. (2023) e Oliveira et al. (2024) reforçam que a educação ambiental, a comunicação social e a formação em escolas e associações potencializam a adesão comunitária e a qualidade da segregação. Ferreira (2024) e Guabiroba et al. (2023) evidenciam a importância de mecanismos institucionais de participação e de monitoramento por indicadores para o aprimoramento contínuo dos sistemas municipais. A ABRELPE (2024) e a ABIPLAST (2024) demonstram que a participação de cooperativas é responsável por mais de dois terços da recuperação de recicláveis, confirmando seu papel estruturante na circularidade brasileira. A consolidação de protótipos locais de gestão depende, portanto, da articulação entre política pública, inovação tecnológica e governança colaborativa, como defendem a OECD (2024) e a Ellen MacArthur Foundation (2017). Ao alinhar ciência dos materiais, regulação e inclusão social, a economia circular transforma a reciclagem de resíduos plásticos de uma prática reativa em um processo estratégico de desenvolvimento sustentável e regeneração produtiva.

REFERÊNCIAS

ABEDSOLTAN, H.; KAZEMI, M.; DASTJERDI, F. **A focused review on recycling and hydrolysis techniques of polyethylene terephthalate.** Polymer Engineering & Science, v. 63, p. 4395–4418, 2023. DOI: 10.1002/pen.26406. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pen.26406>. Acesso em: jun. 2025.

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET. **Análise do ciclo de vida das embalagens PET para alimentos líquidos: Sumário Executivo.** São Paulo: ABIPET, 2024. Disponível em: <https://abipet.org.br/wp-content/uploads/2024/08/Sumario-Executivo-versao-final.pdf>. Acesso em: ago 2025.

ABIPLAST. **Panorama da reciclagem de plásticos no Brasil, ano-base 2023.** São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br> . Acesso em: jun. 2025.

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024.** São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2024. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/publicacao/panorama-2024/> . Acesso em: abr. 2025.

ALLEN, A. **Economia Circular e Blockchain.** . 2025. Disponível em: <http://www.acriacao.com/economia-linear-economia-circular-e-blockchain/> . Acesso em: mai. 2025.

APR, Association of Plastic Recyclers. **APR Design Guide for Plastics Recyclability. Washington, 2022.** Disponível em: <https://plasticsrecycling.org/apr-design-hub/apr-design-guide-overview/> . Acesso em: ago. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12980:1993 – Coleta, varrição e acondicionamento de resíduos sólidos urbanos – Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 1993. (Cancelada em 2004). Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/60179028/NBR-12980-1993-Coleta-varricao-e-acondicionamento-de-residuos-solidos-urbanos> . Acesso em: jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13230:2008 – Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/739274844/ABNT-NBR-13230-2008-Embalagens-e-Acondicionamento-Plasticos-Reciclageis> . Acesso em: jun. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Practice for Coding Plastic Manufactured Articles for Resin Identification (ASTM D7611/D7611M-23).** West Conshohocken: ASTM International, 2023. DOI: 10.1520/D7611-23. Disponível em: <https://www.compliancegate.com/resin-identification-codes/#:~:text=and%20E2%80%9COTHER%E2%80%9D,-,ASTM%20D7611/D7611M%20E2%80%93%20Standard%20Practice%20for%20Coding%20Plastic%20Manufactured%20Articles,Labels> . Acesso em: ago. 2025.

AZEVEDO, A. M. M.; GUTBERLET, J.; ARAÚJO, S. D.; DUARTE, F. H. **Impactos da Covid 19 sobre catadores de materiais recicláveis organizados no Estado de São Paulo.** Ambiente & Sociedade, v. 25, 2022. DOI: 10.1590/1809-4422asoc1901r3vu2022L3AO. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asoc/a/HdwdpNXQtfymkbw7SfbLp9n/?format=pdf&lang=pt> . Acesso em: set. 2025.

BAHERS, Jean-Baptiste; DURAND, Mathieu; BERAUD, Hélène. **Quelle territorialité pour l'économie circulaire? Interprétation des typologies de proximité dans la gestion des déchets.** Flux, Paris, v. 109-110, n. 3, p. 129-141, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3917/flux1.109.0129> . Acesso em: jun. 2025

BRASIL. **Decreto n.º 12.688, de 21 de outubro de 2025.** Regulamenta o art. 32, § 1º, e o art. 33, § 1º da Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010, e institui o sistema de logística reversa de embalagens de plástico. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, 21 out. 2025. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/decreto/D12688.htm . Acesso em: ago. 2025

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm) . Acesso em: 05 ago. 2025

BUCKNALL, D. G. **Plastics as a materials system in a circular economy.** Philosophical Transactions of the Royal Society A, London, v. 378, n. 2176, 2020. DOI: 10.1098/rsta.2019.0268. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0268> . Acesso em: abr. 2025.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 3. ed. São Paulo: Artliber, 2010.

CARRIÈRE, Jean-Paul; DINIZ, Fabiano; DE LA MORA, Luis. **Economia circular: preservação de recursos naturais e práticas urbanas. Uma análise comparativa (Tours, França e Recife, Brasil).** Risco Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo: Dossiê temático: Natureza e Cidade. São Carlos, v. 18, n. 2, p. 35-49, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v18i2p1> . Acesso em: jun. 2025.

CARVALHO, Mariana Vieira; SILVEIRA, Gabriel; GONÇALVES, Flávia; BARROS, Leandro. **Challenges and prospects for sorting and disposing of household solid waste, a case study of a recycling cooperative in Minas Gerais, Brazil.** Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 14, n. 1, e26076, 2025. DOI: 10.5585/2025.26076. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/2025.26076>. Acesso em: nov. 2025.

CGF, Consumer Goods Forum. **The Golden Design Rules, Fact Pack.** 2022. Disponível em: https://goldendesignrules.plasticspact.ca/wp-content/uploads/2022/04/CGF-PWCoA_Golden-Design-Rules-Fact-Pack-March-2022-.pdf . Acesso em: ago. 2025.

COLTRO, L.; GASPARINO, B. F.; QUEIROZ, G. C. **Reciclagem de materiais plásticos: a importância da identificação correta.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 18, n. 2, p. 119-125, 2008. DOI: 10.1590/S0104-14282008000200008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000200008> . Acesso em: ago. 2025.

COMMISSION, European. **Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe.** Brussels: European Commission, 2014. Disponível em: [REVISTA ARACÊ, São José dos Pinhais, v.7, n.12, p.1-40, 2025](https://eur-</p></div><div data-bbox=)

lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:50edd1fd-01ec-11e4-831f-01aa75ed71a1.0001.01/DOC_1&format=PDF. Acesso em: mai. 2025.

COOPER, Harris M. **Research Synthesis and Meta-Analysis: A Step-by-Step Approach.** 5. ed. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2017. ISBN 978-1-5063-3642-3.

DING, Q.; ZHU, H. **The key to solving plastic packaging wastes: design for recycling and recycling technology.** Polymers, v. 15, n. 6, 1485, 2023. DOI: 10.3390/polym15061485. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15061485> . Acesso em: jun. 2025.

DOKL, Monika; COPOT, Anja; KRAJNC, Damjan; FAN, Yee Van; VUJANOVIĆ, Annamaria; AVISO, Kathleen B.; TAN, Raymond R.; KRAVANJA, Zdravko; CUČEK, Lidija. **Global projections of plastic use, end-of-life fate and potential changes in consumption, reduction, recycling and replacement with bioplastics to 2050. Sustainable Production and Consumption**, v. 51, p. 498–518, 2024. DOI: 10.1016/j.spc.2024.09.025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.025>. Acesso em: nov. 2025.

DORNELAS, J. M.; GUIMARÃES, E. C. **Resíduos sólidos urbanos em Uberlândia MG, análise temporal.** Geosul, v. 38, n. 85, p. 109–131, 2023. DOI: 10.5007/2177-5230.2023.e86931. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2023.e86931> . Acesso em: set. 2025.

EFSA, European Food Safety Authority. **Scientific guidance on the criteria for the evaluation and on the preparation of applications for the safety assessment of post-consumer mechanical PET recycling processes intended to be used for manufacturing of recycled PET intended to be used for food contact materials.** EFSA Journal, v. 22, e8879, 2024. DOI: 10.2903/j.efsa.2024.8879. Disponível em: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2024.8879> . Acesso em: ago. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **The new plastics economy: rethinking the future of plastics.** Cowes: EMF, 2017. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics> . Acesso em: abr. 2025.

FELLOWS, C. M.; BURNS, J. A.; DUEVER, T. A.; et al. **Terminology for chain polymerization (IUPAC Recommendations 2021).** Pure and Applied Chemi v. 94, n. 9, p. 1093–1147, 2022. DOI: 10.1515/pac-2020-1211. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/pac-2020-1211> . Acesso em: jun. 2025.

FERREIRA, Eva de Melo; PONTES, Tatiana; NAKANO, Ana. **Waste pickers and their inclusion in Brazilian public environmental decisions, an analysis of 10 years of policy development.** Interações, v. 25, n. 4, e4358, 2024. DOI: 10.20435/inter.v25i4.4358. Disponível em: <https://interacoes.ucdb.br/interacoes/article/view/4358> . Acesso em: out. 2025.

FIALHO, Ana Carolina; SANTOS, Danúbia da Paixão; SANTOS, Júlio Cesar; THOMPSON, Nathália. **Informação ambiental para o desenvolvimento sustentável, o caso da Associação Gota do Óleo de Eunápolis BA.** Encontros Bibli, v. 28, e89667, 2023. DOI: 10.5007/1518-2924.2023.e89667. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/eb/article/view/89667>. Acesso em: out. 2025.

GHOSAL, K.; CHAKRABORTY, S.; BANERJEE, S. **Recent advances in the chemical recycling of polyesters.** Materials Advances, v. 3, p. 3125–3142, 2022. DOI: 10.1039/D1MA01112J.
Disponível em: <https://doi.org/10.1039/D1MA01112J>. Acesso em: jun. 2025.

GRANT, Maria J.; BOOTH, Andrew. **A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies.** Health Information and Libraries Journal, v. 26, n. 2, p. 91–108, 2009. DOI: 10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>. Acesso em: nov. 2025.

GOUGH, David; OLIVER, Sandy; THOMAS, James. **An Introduction to Systematic Reviews. 2. ed.** London: SAGE Publications, 2017. ISBN 978-1-4739-5294-0.

GUABIROBA, Ricardo C. S.; BUCH, Ruy; CAMPOS, Alexandre C.; JACOB, Carlos E. **Sustainability indicators applied to a local strategy context, proposals to improve selective waste collection systems involving waste picker organizations.** Cleaner Waste Systems, v. 5, 100102, 2023. DOI: 10.1016/j.clwas.2023.100102. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100102>. Acesso em: ago. 2025.

HAHLADAKIS, J. N. et al. **An overview of chemical additives present in plastics, migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling.** Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v. 344, p. 179–199, 2018. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.10.014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>. Acesso em: jun. 2025.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11469:2016 – Plastics — Generic identification and marking of plastics products.** Geneva: ISO, 2016. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/63434.html>. Acesso em: ago. 2025.

JOSEPH, T. M.; AZAT, S.; AHMADI, Z.; et al. **Polyethylene terephthalate, PET, recycling, a review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering,** v. 9, 100673, 2024. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100673. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100673>. Acesso em: ago. 2025.

JUNG, H.; LEE, I.; CHO, B. **Review of polymer technologies for improving the recycling and upcycling efficiency of plastic waste.** Chemosphere, v. 320, 138089, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138089. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138089>. Acesso em: jun. 2025.

KORLEY, L. T. J.; EPPS, T. H.; HELMS, B. A.; RYAN, A. J. **Toward polymer upcycling, adding value and tackling circularity.** Science, v. 373, p. 66-69, 2021. DOI: 10.1126/science.abg4503. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.abg4503>. Acesso em: ago. 2025.

KRISHNAKUMAR, B.; SANKA, R.; BINDER, W. H.; PARTHASARATHY, V.; KARAK, N. **Vitrimers: associative dynamic covalent adaptive networks in thermoset polymers.** Chemical Engineering Journal, v. 385, 123820, 2020. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123820. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123820>. Acesso em: jun. 2025.

KUSENBERG, M.; ESCHENBACHER, A.; DJOKIC, M. R.; et al. **Opportunities and challenges for the application of post-consumer plastic waste pyrolysis oils as steam cracker feedstocks, to decontaminate or not to decontaminate?** Waste Management, v. 138, p. 83-115, 2022. DOI:

10.1016/j.wasman.2021.11.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.009>. Acesso em: ago. 2025.

LIMA, Daniela Santos; VIANA, Eliane; FERREIRA, Diego C. **Coleta seletiva e fatores norteadores para adesão, evidências em municípios da região Sul do Brasil.** Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 62, p. 761 783, 2023. DOI: 10.5380/dma.v62i0.82725. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v62i0.82725>. Acesso em: set. 2025.

LUSCOMBE, C. K.; MOAD, G.; HIORNS, R. C.; et al. **A brief guide to polymerization terminology (IUPAC Technical Report).** Pure and Applied Chemistry, v. 94, n. 9, p. 1161–1190, 2022. DOI: 10.1515/pac-2021-0115. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0115>. Acesso em: jun. 2025.

MAGER, M.; BERGHOFER, M.; FISCHER, J. **Polyolefin recyclates for rigid packaging applications, the influence of input stream composition on recyclate quality.** Polymers, v. 15, n. 13, 2776, 2023. DOI: 10.3390/polym15132776. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15132776>. Acesso em: ago. 2025.

MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, U.; MAJUMDAR, S.; LYONS, K.; WILKINSON, S.; VERNER, J.; MUÑOZ-ESPINOSA, D. **Low-cost recognition of plastic waste using deep learning and multi-spectral sensors.** Sensors, v. 24, n. 9, 2821, 2024. DOI: 10.3390/s24092821. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s24092821>. Acesso em: ago. 2025.

MENDES, Lucas Ferreira; LOURENÇO, João Paulo; LIMA, Roberta; CALDAS, Felipe. **Exercise program for workers of a cooperative of recycling, case report.** Revista de Terapia Ocupacional da USP, v. 35, e220307, 2024. DOI: 10.11606/issn.2238 6149.v35i0e220307. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rto/article/view/220307>. Acesso em: out. 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Panorama da Logística Reversa,** Brasil, 2024. Disponível em <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/hortalicas/2024/75a-ro-06-09-2024/apresentacao-embalagens-mapa.pdf> Acesso em: ago. 2025.

MONTEIRO, A. R. D. **Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/11604>. Acesso em: abr. 2025.

MORICI, Elisabetta; DINCHEVA, Nadka Tz. **Recycling of thermoset materials and thermoset-based composites: challenge and opportunity.** Polymers, v. 14, n. 19, p. 4153, 2022. DOI: 10.3390/polym14194153. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14194153>. Acesso em: nov. 2025.

MURRAY, Alan; SKENE, Keith; HAYNES, Kathryn. **The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context.** Journal of Business Ethics, v. 140, n. 3, p. 369-380, 2017. DOI: 10.1007/s10551-015-2693-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>. Acesso em: mai. 2025.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Plastics Science Research and Material Circularity.** Washington: National Academies Press, 2023. DOI: 10.17226/27172. Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/read/27172>. Acesso em: ago. 2025.

NEO, E. R. K.; YEO, Z.; LOW, J. S. C.; GOODSHIP, V.; DEBATTISTA, K. **A review on chemometric techniques with infrared, Raman and laser-induced breakdown spectroscopy for sorting plastic waste in the recycling industry.** Resources, Conservation & Recycling, v. 180, 106217, 2022. DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106217. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106217>. Acesso em: ago. 2025.

NORDAHL, S. L.; BARAL, N. R.; HELMS, B. A.; SCOWN, C. D. **Complementary roles for mechanical and solvent based recycling in low carbon, circular polypropylene.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 120, e2306902120, 2023. DOI: 10.1073/pnas.2306902120. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2306902120>. Acesso em: set. 2025.

OECD. **Global plastics outlook: policy scenarios to 2060.** Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2022. DOI: 10.1787/aa1edf33-en. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>. Acesso em: abr. 2025.

OECD. **Plastics recycled content requirements.** OECD Environment Working Papers, n. 236, Paris: OECD Publishing, 2024. DOI: 10.1787/b311ee60-en. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/b311ee60-en>. Acesso em: mai. 2025.

OLIVEIRA, Vivian Verner Guedes; LORDELO, Lidiane Mendes Kruschewsky; ALMEIDA, Rosa Alencar Santana de. **Estudo comparativo sobre a geração de resíduos sólidos e implantação da coleta seletiva em escolas públicas e privadas em Cruz das Almas, Bahia.** Revista Brasileira de Educação Ambiental, v. 19, n. 2, p. 338 358, 2024. DOI: 10.34024/revbea.2024.v9.15890. Disponível em: <https://doi.org/10.34024/revbea.2024.v9.15890> . Acesso em: out. 2025.

PIAIA, J. A.; CAMPOS, J. R.; ABREU, M. F.; et al. **Production of solid recovered fuel from the rejected fraction of municipal solid waste in Brazil.** Circular Economy, v. 3, n. 3, 14, 2023. DOI: 10.3390/circular3030014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biomass3030014>. Acesso em: ago. 2025.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; VAN GEEM, K. **Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste.** Waste Management, Oxford, v. 69, p. 24–58, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.07.044. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044> Acesso em: jun. 2025.

RODRIGUES, S. F.; FERREIRA, J. R.; SANTOS, H. M. **A reciclagem e os aspectos socioeconômicos dos catadores de resíduos sólidos do aterro sanitário de Ilhéus – Bahia.** Revista Brasileira de Políticas Públicas, Brasília, v. 10, n. 2, p. 85–101, 2020. DOI: 10.48075/igepec.v18i2.7319. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/igepec.v18i2.7319>. Acesso em: abr. 2025.

ROOSEN, M.; MYS, N.; KUSENBERG, M.; et al. **Detailed analysis of the composition of selected plastic packaging waste and its implications for mechanical and thermochemical**

recycling. Environmental Science & Technology, v. 54, p. 13282-13293, 2020. DOI: 10.1021/acs.est.0c03371. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03371>. Acesso em: ago. 2025.

ROSENBOOM, J.-G.; LANGER, R.; TRAVERSO, G. **Bioplastics for a circular economy.** Nature Reviews Materials, v. 7, p. 117–137, 2022. DOI: 10.1038/s41578-021-00407-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>. Acesso em: jun. 2025.

SÁ, Ana Carolina Nóbrega; SILVA, Milena Rodrigues; SARI, Adriana C. N. **Indicadores de sustentabilidade para avaliação de programas de coleta seletiva, estudo de caso em João Pessoa, Paraíba.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 28, e20220103, 2023. DOI: 10.1590/S1413-415220220103. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220103>. Acesso em: out. 2025.

SANJAD, Heitor Capela. **Reciclagem como alternativa para a eficiência e sustentabilidade econômica do setor de resíduos sólidos urbanos no município de Belém – PA.** 2018. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/10171>. Acesso em: nov. 2025.

SCHYNS, Z. O. G.; SHAVER, M. P. **Mechanical recycling of packaging plastics: a review.** Macromolecular Rapid Communications, v. 42, e2000415, 2021. DOI: 10.1002/marc.202000415. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>. Acesso em: jun. 2025.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais.** 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SHAMUYEVA, M.; ENDRES, HJ. **Plásticos no contexto da economia circular e reciclagem sustentável de plásticos: revisão abrangente sobre pesquisa, padronização e mercado.** Cleaner Environmental Systems , v. 2, 100011, 2021. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100168. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100168>. Acesso em: ago. 2025.

SILVA, T. G. E. et al. **Economia circular: um panorama do estado da arte das políticas públicas no Brasil.** Revista Produção Online, Florianópolis, v. 21, n. 3, p. 951–972, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v21i3.4354>. Acesso em: jun. 2025.

SOARES, C.T.M.; EK, M.; OSTMARK, E.; GÄLLSTEDT, M.; KARLSSON, S. **Recycling of multi-material multilayer plastic packaging: Current trends and future scenarios.** Resources, Conservation & Recycling, v. 176, 105905, 2022. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105905. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105905>. Acesso em: ago. 2025.

SOLIS, M.; SILVEIRA, S. **Technologies for chemical recycling of household plastics.** Waste Management, v. 105, p. 128-138, 2020. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.01.038. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>. Acesso em: nov. 2025.

UNEP, United Nations Environment Programme. **Turning off the tap, how the world can end plastic pollution and create a circular economy.** Nairobi, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/turning-off-tap-end-plastic-pollution-create-circular-economy>. Acesso em: ago. 2025.

VOLLMER, I.; JENKS, M. J. F.; ROELANDS, M. C. P.; et al. **Beyond mechanical recycling, giving new life to plastic waste.** Angewandte Chemie International Edition, v. 59, p. 15402-15423, 2020. DOI: 10.1002/anie.201915651. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>. Acesso em: ago. 2025.

WALKER, T. W.; FOWLER, C. I.; GONZÁLEZ-PARRA, J.; et al. **Recycling of multilayer plastic packaging materials by solvent-targeted recovery and precipitation.** Science Advances, v. 6, eaba7599, 2020. DOI: 10.1126/sciadv.aba7599. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aba7599>. Acesso em: 06 ago. 2025.

XU, Zhuo; SANCHEZ-RIVERA, Kevin; GRANGER, Charles; ZHOU, Panzheng; MUNGUIA-LOPEZ, Aurora del Carmen; IKEGWU, Ugochukwu M.; AVRAAMIDOU, Styliani; ZAVALA, Victor M.; VAN LEHN, Reid C.; BAR-ZIV, Ezra; DE MEESTER, Steven; HUBER, George W. **Solvent-based plastic recycling technologies.** Nature Chemical Engineering, v. 2, p. 407–423, jul. 2025. DOI: 10.1038/s44286-025-00247-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s44286-025-00247-1>. Acesso em ago. 2025

YUGUE, Eduardo Tadashi. **Desafios e potenciais soluções para reciclagem de embalagens plásticas flexíveis pós-consumo no Brasil.** 2020. 231 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/d17cf8a5-8a65-4db6-9470-d7ddbd30543b>. Acesso em: set. 2025.

ZHAO, B.; CHEN, Y.; CHEN, Y.-E.; et al. **Catalytic conversion of mixed polyolefins under mild conditions.** The Innovation, v. 5, 100586, 2024. DOI: 10.1016/j.xinn.2024.100586. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100586>. Acesso em: ago. 2025.