

## Sustentabilidade em materiais poliméricos: Uma revisão sobre conceitos básicos, desafios socioeconômicos e inovações no campo da nanotecnologia



<https://doi.org/10.56238/sevened2023.008-024>

### Vitor de Freitas Cardoso

Bacharelados em Nanotecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

### Camila Nogueira da Silva Batista

Bacharelados em Nanotecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

### Mariana Loyola Moura

Bacharelados em Nanotecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

### Lizandra Viana Maurat da Rocha

Pós-doutoras, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

### Ana Catarina de Oliveira Gomes

Pós-doutoras, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

### RESUMO

O presente texto foi elaborado de forma colaborativa, pelos alunos do curso de graduação em Nanotecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sob a mediação e orientação das professoras Lizandra Maurat e Ana Catarina Gomes, como parte dos processos de avaliação

somativa e formativa da disciplina “Sustentabilidade Aplicada a Materiais Poliméricos”. O emprego desta metodologia ativa tentou fixar e resumir os tópicos abordados em aula, além de divulgar e discutir o tema, através de uma revisão integrativa dos conceitos fundamentais, desafios socioeconômicos e avanços relacionados ao contexto. Foi ressaltada aqui a necessidade crescente da pesquisa, estudo e conhecimento básico da físico-química dos polímeros, para, somente assim, conceber classificações e discussões em termos de sustentabilidade, considerando a complexidade das interações entre os materiais poliméricos, sociedade e meio ambiente. Este texto destaca as complicações ecológicas e socioeconômicas associadas a esses materiais, bem como discute as inovações emergentes na nanotecnologia como potenciais soluções. Foi possível, ao integrar todos os assuntos, encadear uma compreensão abrangente do tema, destacando a importância de abordagens inovadoras para contornar os desafios da aplicação e avaliação de materiais poliméricos, nanoestruturados ou não.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade, Polímeros, Nanotecnologia, Metodologias Ativas, Ensino de Ciências de Materiais.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS - INTRODUÇÃO, HISTÓRICO E CLASSIFICAÇÕES

Em 1823, Mackintosh, um pesquisador inglês, fez uma importante descoberta ao perceber que a borracha poderia ser dissolvida em nafta de carvão. Essa solução permitiu o uso da borracha, após a evaporação do solvente, para revestir tecidos e torná-los impermeáveis <sup>[1]</sup>. Entre os anos de 1820 e 1824, Thomas Hancock foi pioneiro no desenvolvimento das primeiras misturas de polímeros, combinando borracha natural com gutta-percha <sup>[2]</sup>. Mas o primeiro registro do termo “polimérico” ocorreu entre 1832 e 1833, com o químico sueco-alemão Jöns Jacob Berzelius, que o atribuía esta classificação a substâncias formadas por unidades moleculares repetidas, em especial, compostos com



pesos moleculares elevados e múltiplos. Porém, o termo “polímero” só ficou mais conhecido e começou a ser amplamente usado após 1922. A palavra, escolhida em função da característica estrutural do material, tem origem grega (*polus+meros*) e significa “muitas partes” [3, 4, 5].

A contribuição de Charles Goodyear, em 1839 nos Estados Unidos, foi fundamental. Ele descobriu que a borracha natural adquire elasticidade quando misturada com enxofre e submetida ao aquecimento, um processo conhecido como vulcanização. Essa descoberta revolucionou a indústria da borracha, conferindo-lhe propriedades desejáveis, como maior resistência e durabilidade [6]. Ao longo dos anos, outros marcos significativos na evolução dos polímeros destacam-se, começando em 1846 com a patente para cabos condutores isolados com guta-percha. O surgimento do nitrato de celulose plasticizado pelos irmãos Hyatt em 1870-1872 e o desenvolvimento do primeiro pneu inflável por Dunlop em 1888 marcaram avanços notáveis. O ano de 1907 testemunhou a criação da baquelite, o primeiro polímero sintético termoendurecível, por Leo Baekeland. A década de 1920, como já mencionado, trouxe conceitos fundamentais, como a proposta de Staudinger sobre cadeias moleculares de polímeros. Descobertas subsequentes incluíram a síntese do PVC em 1912, o polietileno, em 1933 e o nylon, em 1934. Avanços notáveis continuaram nas décadas seguintes, culminando na descoberta da polimerização estereoespecífica por Ziegler e Natta em 1954. A evolução persiste, com a atual ênfase no desenvolvimento de novos materiais de engenharia por meio de mistura, compatibilização e criação de novos polímeros [7].

A Professora Eloisa Biasotto Mano desempenhou um papel fundamental na história da Ciência e Tecnologia de Polímeros no Brasil, dedicando sua carreira ao desenvolvimento pioneiro dessa área no nosso país. Seu impacto pode ser traçado desde os primeiros anos de sua formação acadêmica na Escola Nacional de Química da Universidade do Brasil, onde se diplomou em Química Industrial e Engenharia Química. A entrada da Professora Eloisa no campo dos polímeros ocorreu em 1954, quando assumiu o cargo de Químico-Tecnologista no Laboratório de Borracha e Plásticos do Instituto Nacional de Tecnologia. Reconhecendo a necessidade de aprimorar seus conhecimentos, ela buscou treinamento em Ciência de Polímeros na Universidade de Illinois, EUA, sob a orientação do renomado Professor Carl S. Marvel. Essa experiência internacional foi crucial para o enriquecimento de seu entendimento sobre polímeros. De volta ao Brasil, a Professora Eloisa, agora Catedrática de Química Orgânica, introduziu práticas de polimerização nas aulas de laboratório, despertando o interesse dos alunos pelo universo dos plásticos e borrachas. Em 1968, liderou a criação do Grupo de Polímeros, que se tornou o embrião do Instituto de Macromoléculas da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IMA), sendo uma iniciativa pioneira no país [8].

O IMA, idealizado pela Professora Eloisa, tornou-se um centro multidisciplinar de excelência em estudos de polímeros, contando com pesquisadores de diversas áreas. Seu esforço incansável para superar desafios financeiros e burocráticos resultou na construção do prédio do instituto em 1978,



marcando o início de uma nova fase. Além de consolidar o IMA como referência internacional, a Professora Eloisa promoveu encontros internacionais, como o IUPAC International Symposium on Macromolecules, e os Seminários de Polímeros (SEMPOL), fortalecendo os laços entre pesquisadores brasileiros e estrangeiros. Seu legado também inclui uma produção científica impressionante, com mais de 200 trabalhos publicados, 6 patentes de invenção e a orientação de mais de meia centena de teses. Seu impacto na ciência de polímeros foi reconhecido com prêmios nacionais e internacionais, culminando na Grã-Cruz da Ordem Nacional do Mérito Científico concedida pelo Presidente Fernando Henrique Cardoso em 2000. O Prêmio Professora Eloisa Mano, criado pela Associação Brasileira de Polímeros em sua homenagem, destaca o legado duradouro dessa notável cientista e educadora [8, 9].

Compreendido o histórico destes materiais, pode-se aprofundar o conhecimento químico-teórico: os polímeros são macromoléculas obtidas por adição ou condensação de monômeros - micromoléculas de baixo peso molecular com capacidade de reagir e se unir com moléculas idênticas ou semelhantes. Parafraseando a saudosa professora Eloisa Mano, destaca-se: “todos os polímeros são macromoléculas, porém nem todas as macromoléculas são polímeros”. A união de um ou mais tipos de monômeros (polimerização) resulta em longas cadeias, formadas por porções repetitivas, ligadas covalentemente entre si, as quais são denominadas “meros” - unidades estruturais fundamentais dos polímeros. O número de meros associados (grau de polimerização da molécula), é quantificado numericamente como a massa molar polimérica, a qual estão associadas as mais diversas propriedades físico-químicas e mecânicas. Estes materiais são popularmente conhecidos como plásticos, borrachas e fibras. As resinas são líquidos poliméricos muito viscosos, de peso molecular intermediário; e os oligômeros são polímeros de muito baixo peso molecular [5, 10, 11].

As características distintivas polímeros começam a manifestar-se na ordem de  $10^3$  e tornam-se mais notáveis à medida que a massa molar aumenta, podendo atingir a ordem de milhões. A maioria dos polímeros utilizados na indústria possui uma massa molar na faixa de dezenas ou centenas de milhares. Na literatura, são comumente mencionados três tipos principais de massa molar - a média numérica ( $M_n$ ), a média ponderal ( $M_w$ ) e a média viscosimétrica ( $M_v$ ). As discrepâncias nos valores dos pesos moleculares médios,  $M_n$ ,  $M_w$  e  $M_v$ , resultam dos processos utilizados para obtê-los, uma vez que são influenciados pela natureza polimolecular dos polímeros. Diversos métodos são empregados na determinação da massa molar. Entre eles, destacam-se a análise de grupos terminais, crioscopia, ebulioscopia, osmometria de pressão de vapor, osmometria de membrana, cromatografia de permeação em gel, espalhamento de luz, ultracentrifugação e viscosimetria. Cada abordagem oferece uma perspectiva única, explorando diferentes propriedades e comportamentos da substância para proporcionar uma estimativa da sua massa molar [5].



A complexa integração das informações sobre a estrutura química, propriedades, aplicações e condições de manufatura mostram uma gama de possibilidades para esse tipo de material, justificando seu extensivo uso e enfatizando a necessidade constante da evolução e ampliação do seu estudo [5, 11].

Os polímeros podem ser obtidos através de diferentes meios e variadas fontes precursoras. Podem ser encontrados na natureza (como elastina, colágeno, proteínas em geral, polissacarídeos e ácidos nucleicos) ou obtidos em laboratórios (como o polietileno, polipropileno, poliestireno e poliuretanos), dividindo-se, assim, em dois grandes grupos: naturais ou sintéticos. A depender dos organismos envolvidos na síntese ou das matérias-primas utilizadas, também podem ser distinguidos em subgrupos tais como: polímeros de fonte fóssil, vegetal, animal, bacteriana, fúngica etc. Abaixo, estão listados alguns critérios e tipos de classificação de polímeros [5, 11, 12, 13, 14, 15].

- a) origem
  - polímero natural
  - polímero sintético
- b) quantidade de tipos de monômeros
  - homopolímero
  - copolímero (2 ou mais tipos de meros diferentes)
  - alternado
  - aleatório
  - em bloco
  - enxertado
- c) tipo de interação de cadeia
  - cadeia linear
  - cadeia ramificada
  - cadeia com ligações cruzadas
  - cadeia reticulada
- d) método de preparação
  - polímero de adição
  - polímero de condensação
  - polímero obtido por modificação
- e) tipo de encadeamento
  - polímero cabeça-cauda
  - polímero cabeça-cabeça
  - polímero cauda-cauda
- f) configuração dos átomos na cadeia
  - polímero cis



- polímero trans
- g) taticidade da cadeia
  - polímero isotático
  - polímero sindiotático
  - polímero atático
- h) grupo funcional presente na estrutura
  - poliésteres
  - poliamidas
  - poliálcoois etc.
- i) fusibilidade e/ou solubilidade
  - polímero termoplástico (amolecimento ocorre pelo aumento da temperatura e a solidificação, mediante resfriamento, em um procedimento reversível)
  - polímero termorrígido (não são moldáveis, mas sim degradados pela ação da temperatura)
- j) comportamento mecânico
  - plástico (rígido ou flexível)
  - elastômero (borracha)
  - fibra (corpo flexível, cilíndrico, com pequena seção transversal e elevada razão de aspecto; é formada por macromoléculas lineares, orientadas longitudinalmente e resiste a variações de temperatura entre sem uma alteração substancial das propriedades mecânicas)
- k) degradabilidade
  - biodegradáveis
  - não se degradam numa velocidade observável, em condições ambientais.

Os processos de polimerização apresentam as mais diversas possibilidades técnicas, em termos de materiais e métodos, o que torna suas variáveis responsáveis pelas propriedades finais do material polimérico. As condições de obtenção dos polímeros são de grande importância, não só no que tange às características moleculares, que interferem na sua aplicação cotidiana e industrial, mas também no que diz respeito às peculiaridades do processo de síntese, processamento e reaproveitamento ou reciclagem, os quais refletem na destinação final, viabilidade e competitividade socioeconômicas do material [5, 11].

De modo geral, os métodos de preparação de polímeros variam em termos de tipo ou mecanismo de reação, formação de subprodutos micromoleculares e velocidade de crescimento da cadeia. A poliadição é, como o nome sugere, a união direta de monômeros, formando cadeias carbônicas ligadas covalentemente, a partir de 3 blocos de reações (iniciação, propagação e terminação), que ocorrem sucessiva ou simultaneamente, sem que haja a formação de subprodutos. Neste tipo de polimerização, o grau de polimerização e a velocidade reacional são elevados, com a



formação imediata dos polímeros, como observa-se para o polietileno, poliestireno e poli(metacrilato de metila). Os polímeros de condensação diferem dos polímeros de adição ao incorporar átomos de elementos diversos, como oxigênio, nitrogênio, enxofre e fósforo, na cadeia principal. Além disso, a policondensação consiste numa única reação, porém dada em etapas, em que não há distinção entre o início da formação do polímero e o crescimento macromolecular; a conversão é alta, mas o crescimento da cadeia é lento e estatístico, atingindo um peso molecular significativo após a intercondensação dos segmentos menores. O peso molecular resultante é geralmente uma ordem de grandeza menor do que o obtido na poliadição. Exemplos de polímeros de condensação incluem o poli(tereftalato de etileno) - PET, o poli(acetato de vinila) - PVAc e o PA-6.6, poli(hexametileno-adipamida). Em casos de monômeros aldeídicos ou lactamas, a polimerização ocorre pela carbonila ou abertura do anel lactâmico, introduzindo heteroátomos na cadeia, como em polioximetileno e policaprolactama. Alguns polímeros, como os poliuretanos, combinam características de ambas as reações. Ainda, há polímeros (como o poli(álcool vinílico) - PVAI) cuja produção só é possível através da modificação de um polímero preexistente (PVAc, no caso do PVAI), sem que haja uma combinação de monômeros para sua formação. E, em termos de técnicas de polimerização, há a possibilidade de obtenção de polímeros em meio homogêneo (polimerização em massa ou em solução) ou heterogêneo (em lama, em suspensão, em emulsão ou polimerização interfacial) [5, 7, 10, 16].

Embora haja materiais poliméricos industriais amplamente explorados como a borracha natural, excelente elastômero obtido pela sangria do látex da seringueira, a maior parte dos polímeros com propriedades suficientemente satisfatórias a ponto de serem comercializados em larga escala são produzidos a partir de derivados do petróleo. Buscando uma forma mais sustentável de obter polímeros, existem as alternativas “verdes” ao uso dos polímeros fósseis - utilizar polímeros naturais modificados ou aprimorados (a exemplo dos nanocompósitos) ou mesmo adaptar a rota de obtenção de um polímero fóssil para torná-la menos agressiva, com intermediários menos tóxicos, gastando menos energia ou gerando menos resíduo para o meio ambiente [11, 17].

## 1.2 POLÍMEROS INDUSTRIAIS E COTIDIANOS

Devido à amplitude do conceito de polímeros e às variadas propriedades que os mesmos podem possuir, a sociedade humana buscou-os e adequou-se à sua presença. A aplicação de materiais para o desenvolvimento humano, em qualquer área que seja, foi limitada por algumas poucas classes dos mesmos durante a maior parte da existência humana, até recentemente, com a produção de polímeros de fabricação humana, que alterou as escalas do possível e praticável. A natureza já oferecia polímeros de uso muito antes de começarmos a sintetizar qualquer coisa, no entanto. Desconsiderando o aspecto polimérico de proteínas e do próprio DNA, ainda temos o amido, a celulose e a borracha natural como polímeros usados por humanos ao longo de anos para facilitação da vida. [1, 2, 4].



Nossa compreensão dos polímeros naturais foi essencial para um avanço tecnológico. No século XIX, a borracha vulcanizada permitiu conquistas científicas e avanços na comodidade e mobilidade urbana. Até hoje a borracha vulcanizada é um dos polímeros mais presentes na rotina da maioria dos seres humanos [1, 5, 6].

Lançando o olhar para a síntese humana de polímeros, a introdução dos mesmos na sociedade tomou um ímpeto acelerado, com a presença dos mesmos sendo mais e mais acentuada conforme aproximamos o ponto de análise do momento atual. A aparição de fibras sintéticas na indústria têxtil foi bem marcada pela aplicação bem-sucedida do Nylon®, produzindo roupas já ao final da década de 30, e sendo logo absorvido em outras áreas, como a militar e a industrial. Esse padrão de desenvolvimento seguido de aplicação em múltiplas áreas se repete ao longo das décadas para variados polímeros que são utilizados até hoje [4, 18].

A vida moderna como é compreendida pela maioria da população global é impensável se removermos a atuação dos polímeros sobre ela, pois a participação deles é denotada nas mais importantes e diversas áreas de aplicação: embalagens, indústria automobilística, indústria eletrônica, setor de saúde, construção civil, indústria têxtil, setor aeroespacial, indústria alimentícia, produção e armazenamento de energia, reciclagem, engenharia sanitária, entre outros. Alguns exemplos dos polímeros mais utilizados incluem polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), teflon (PTFE), politereftalato de etileno (PET) e o nylon (poliamidas em geral) [2, 12, 19, 20, 21, 22, 23].

### 1.3 CARACTERIZAÇÃO DE POLÍMEROS

A análise de polímeros engloba um conjunto diversificado de técnicas e métodos analíticos empregados para identificar as propriedades físicas, químicas e mecânicas de um material específico. A caracterização envolve a avaliação de diversas propriedades que delineiam sua estrutura, comportamento e aplicabilidade; e tem como objetivo a avaliação desses materiais em relação, principalmente, a: estrutura química, viscosidade, microestrutura, cor e opacidade, resistência e resposta térmica, propriedades mecânicas, tamanho médio e distribuição - de cadeia e partícula, carga superficial, morfologia e superfície, solubilidade em água, compatibilidade biológica, degradabilidade em meios diversos, avaliação farmacocinética e farmacodinâmica, atividade antimicrobiana, antioxidante e de barreira a gases e vapor d'água [23, 24, 25, 26, 27].

A determinação do peso molecular, ou massa molar, pode ser realizada por meio de métodos como cromatografia de exclusão por tamanho (SEC ou SEC/HPLC), espectrometria de massas (MS) e viscosimetria; já a análise de tamanho de partícula, via SEC ou espalhamento dinâmico de luz (DLS). Para identificar a composição química e a estrutura dos polímeros, aspectos cruciais para suas propriedades, empregam-se técnicas como ressonância magnética nuclear de carbono ou hidrogênio



(RMN C<sup>13</sup> ou H<sup>1</sup>) e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). A análise da morfologia e da superfície, pode ser conduzida por meio de técnicas de microscopia, incluindo microscopia eletrônica de varredura (MEV), transmissão (MET) e de força atômica (AFM). Propriedades mecânicas como resistência à tração, flexão, dureza e tenacidade são avaliadas por meio de testes específicos, orientados pelas normas da American Society for Testing and Materials (ASTM), enquanto as propriedades térmicas são investigadas por técnicas como análise termogravimétrica (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC). O desempenho elétrico ou isolante é testado através da constante dielétrica e resistividade dielétrica. O comportamento reológico, que destaca a resposta do polímero ao fluxo sob tensão, é analisado por técnicas como reometria capilar e de Torque, Haake. Propriedades ópticas, tais como transmitância, reflexão e absorção de luz, são avaliadas utilizando espectroscopia de UV-vis e espectroscopia de absorção na região do infravermelho próximo. Em aplicações de embalagens, a capacidade de bloquear gases e líquidos é examinada através de técnicas de permeabilidade e difusão para caracterizar as propriedades de barreira. A análise da microestrutura do cristal e da composição química de superfície, relevante em aplicações de adesão e revestimento, é conduzida por meio de espectroscopia de fotoelétrons por raio X (XPS) e difração de raios X (DRX) [28, 29, 30].

Essas abordagens proporcionam uma compreensão completa das propriedades dos polímeros, contribuindo para sua aplicação eficaz em diversas áreas. A caracterização resulta da combinação de várias dessas técnicas citadas, a depender das especificações do material com o qual se trabalha, do tempo e do aparato disponíveis, bem como da aplicação e destinação final propostas, que, por sua vez, irão delimitar as propriedades específicas que se deseja obter e que são, portanto, necessárias de se avaliar. A partir disso, é possível projetar as propriedades e o comportamento do material em diferentes condições.

#### 1.4 (BIO)DEGRADABILIDADE DE POLÍMEROS

Biodegradação é a conversão orgânica do polímero em biomassa, água, gás carbônico e outros gases. Polímeros biodegradáveis são uma contribuição para um futuro sustentável. A preocupação com a poluição ambiental e os impactos negativos de resíduos plásticos no nosso planeta, principalmente nos oceanos, tem levado a um aumento na pesquisa e desenvolvimento de novos materiais. Os polímeros biodegradáveis são materiais capazes de serem decompostos por microrganismos vivos em subprodutos naturais e inofensivos para o meio ambiente. Eles são uma alternativa que têm recebido destaque como uma abordagem para reduzir problemas ambientais associados aos polímeros tradicionais, que podem persistir no ambiente e em outros seres vivos por vários anos. Mesmo os sintéticos são projetados para atender às necessidades dos consumidores e da indústria, mantendo as propriedades desejadas, porém com um ciclo de vida menor, sendo mais amigável com o meio



ambiente. Há várias classes de polímeros biodegradáveis, podendo ser de obtidos de fontes renováveis, como o amido, celulose, proteínas, PLA e PHA, ou a partir de fontes não renováveis, como polímeros sintéticos projetados ou modificados para serem biodegradáveis [12, 14, 15, 17, 31].

A biodegradabilidade de um material é influenciada por vários fatores, incluindo a sua estrutura química, o ambiente a que ele está submetido e as condições da microbiota em torno dele. Materiais poliméricos biodegradáveis degradam mais rapidamente em condições específicas de umidade, temperatura, pH e presença e quantidade de determinados gases, metais e microrganismos. Assim, os polímeros biodegradáveis acabam tornando-se mais adequados para aplicações nas quais a sua disposição final ocorre em ambientes naturais, que é o caso de diversas sacolas e embalagens, sobretudo alimentícias [32, 33, 34].

Levando em consideração as informações apresentadas, é importante ressaltar que polímeros biodegradáveis não podem ser elencados como a solução de todos os problemas relacionados aos “plásticos”, pois a biodegradação depende de uma série de fatores, como a estrutura polimérica requisitada (como cadeias alifáticas com carbono terciário, insaturação entre carbonos e grupos funcionais hidrolisáveis - ligação éster, amida, acetal), manutenção de equilíbrio no ecossistema compostagem, a disponibilidade de microrganismos adequados e a condição do polímero em questão. Em alguns casos, a biodegradação pode não ocorrer, com a obstrução do processo na etapa inicial de fragmentação, resultando na formação microplásticos, que podem ter severos impactos ambientais, com danos de porte até então desconhecido [35, 36, 37, 38, 39, 40].

O mais importante quando se trata desse tópico é educar os consumidores sobre os benefícios e as limitações dos polímeros biodegradáveis, para que não seja perdida a possibilidade de degradação nem se confunda este conceito com o de reciclabilidade, que não implica em biodegradabilidade nem vice-versa. Reciclagem, por outro lado, consiste em transformar os materiais descartados em novos produtos ou matérias-primas. A conscientização é fundamental para evitar que sejam os materiais descartados erroneamente, contaminando sistemas de reciclagem e compostagem, enquanto deveriam ser encaminhados corretamente no final de sua vida útil, reduzindo o desperdício, economizando recursos naturais e minimizando impactos socioeconômicos e ambientais [35 - 40].

Cabe ressaltar fatores mercadológicos que dificultam ou até mesmo impossibilitam a biodegradação polimérica: a sujidade com materiais impermeáveis ou tóxicos, a presença de outros polímeros de cadeia não degradável na matriz e a inserção de aditivos na sua composição, tais como agente de vulcanização, acelerador, catalisador, ativador, antioxidante, carga (reforçadora ou inerte), plastificante, estabilizador, corante, lubrificante, agente de cura ou agente de esponjamento [12, 15, 39].

À medida que a demanda por soluções sustentáveis para materiais poliméricos de uso único (como máscaras, copos, canudos, talheres, pratos) cresce, ocorrem avanços contínuos na pesquisa e na indústria que fazem os polímeros biodegradáveis desempenharem um papel significativo na redução



do impacto ambiental causado pelos materiais plásticos. Entretanto, a abordagem mais eficaz para os desafios ambientais relacionados aos polímeros é uma combinação de redução do uso desenfreado de descartáveis, reciclagem eficaz e, por fim, adoção responsável de polímeros biodegradáveis, quando possível e apropriado. A biodegradabilidade representa um passo em direção a um futuro mais sustentável, mas requer um compromisso coletivo da sociedade, indústria e governos, para garantir que os custos sejam acessíveis a todos e assim os benefícios socioambientais sejam alcançados e mantidos.

A avaliação da degradação polimérica pode ser conduzida através do monitoramento do crescimento de microorganismos, acompanhando o consumo do substrato, aferindo o consumo de O<sub>2</sub> e a liberação de CO<sub>2</sub>, observando e mensurando as alterações nas propriedades (físicas/químicas/estruturais) ou até mesmo empregando modelagem matemática para fazer previsões que contribuam no estudo da cinética de degradação [12, 35, 40].

## 1.5 RECICLABILIDADE DE POLÍMEROS

Diante do aumento global no descarte inadequado de polímeros, sobretudo plásticos, a reciclagem emerge como mais uma via promissora para abordar essa problemática. Contudo, é imperativo reconhecer que o processo de reciclagem convencional, adotado em larga escala, revela-se ineficaz. Mesmo quando implementado em uma escala inferior à sua capacidade máxima, enfrenta desafios significativos nos âmbitos econômico e logístico, evidenciando a necessidade premente de estratégias mais robustas e abrangentes [38, 41].

A reciclabilidade de um polímero é determinada pela possibilidade e facilidade com a qual ele pode ser reintroduzido ao ciclo de processamento, seja com simples alterações termomecânicas (formação de *pellets* e similares para nova produção), com reaproveitamento da estrutura química, com a reaquisição de um produto de valor utilizado no polímero, ou simplesmente com a recuperação de parte da energia gasta para atingir o produto final [18, 36, 38].

Em geral, a fusibilidade é o fator crucial para a reciclabilidade termomecânica de um polímero. Os termoplásticos, por exemplo, podem ser remodelados termicamente sem perda significativa de propriedades, viabilizando seu reaproveitamento. As dificuldades da reciclagem termo-mecânica tendem a ser os aditivos industriais que comprometem o processo e impedem o uso de um polímero em uma aplicação que exija maior pureza; assim como o prejudica bastante o mau uso ou desleixo no descarte do material (com falta de limpeza ou direcionamento incorreto), agregando-lhe impurezas e afetando todo o processo. Um obstáculo adicional na reciclagem de polímeros é o estabelecimento de um limite máximo bem definido para a quantidade de material reciclado permitida em certos produtos. Em alguns casos, é até mesmo proibido o uso de material reciclado devido à natureza específica de



alguns artigos feitos com polímeros (como em materiais hospitalares), o que impõe restrições significativas em determinadas áreas [42, 43, 44].

Outras formas de reciclagem, no entanto, contam com o aproveitamento de partes (monômeros, aditivos, matérias-primas), ao invés de considerar a estrutura química final do polímero. Dentre essas, a reciclagem química busca transformar os polímeros em materiais de produção básicos, em geral para uma síntese polimérica subsequente, ou para a reaquisição de demais produtos (costumeiramente petroquímicos). O fator determinante desse processo vem da vulnerabilidade do polímero às técnicas mais comuns, como a hidrólise [41, 45, 46].

A reciclagem energética de polímeros envolve a queima controlada de resíduos plásticos para gerar calor ou eletricidade. Esse processo inclui a coleta, triagem e pré-tratamento dos plásticos antes da queima ou pirólise, onde ocorre a decomposição térmica. O calor gerado é então utilizado para produzir vapor, que alimenta turbinas para gerar eletricidade. Embora seja uma alternativa para plásticos de difícil reciclagem mecânica, a reciclagem energética enfrenta críticas devido à possível emissão de poluentes, destacando a importância de tecnologias de controle de emissões. Essa abordagem é vista como secundária, sendo preferível priorizar a redução do uso de plásticos e a promoção de métodos de reciclagem mais sustentáveis [47, 48, 49].

## 1.6 POLÍMEROS - SAÚDE E TOXICIDADE

A dualidade dos polímeros é evidente, uma vez que estes materiais são frequentemente mencionados na literatura científica e nos meios de comunicação de massa ora como algozes ora como o artifício ideal para diversas finalidades. Quando descartados rápida e inadequadamente, os polímeros podem se acumular, persistir na natureza por muitos anos, gerar microplásticos, se dispersar ou mesmo podem se tornar carreadores de agentes tóxicos, contribuindo para a poluição ambiental e representando ameaças à saúde humana e à biodiversidade. No entanto, essa mesma classe de materiais exibe um potencial notável quando aplicada de maneira responsável - são cada vez mais utilizados como matriz para embalagens alimentícias, cosméticos e bases biocompatíveis de implantes, próteses, medicamentos, lentes de contato, curativos, fios de sutura, utensílios para manejo clínico (pinças, bolsas, máscaras, luvas, drenos *etc*) e dispositivos de diagnóstico. Sua versatilidade em termos de propriedades tornam-nos fundamentais na criação de produtos cada vez mais inovadores e eficientes [2, 4, 5, 27, 34, 35, 37, 50].

No panorama atual das populações urbanas, a gestão eficiente do tempo é crucial, impulsionando o crescimento constante do mercado de produtos prontos para consumo rápido, com embalagens de uso único. Os rigorosos padrões sanitários em algumas áreas, como a de alimentos e saúde, por exemplo, favorecem a adoção de plásticos descartáveis que minimizem riscos para o consumidor. Apesar de alguns aspectos desfavoráveis, os polímeros emergem como uma solução



econômica muito vantajosa e versátil, justificando sua ampla utilização, sobretudo em produtos descartáveis de uso único ou reuso limitado. Os polímeros deste grupo são classificados como *commodities* - a exemplo do polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET). Fabricados em larga escala, com baixo valor individual agregado, porém alta importância socioeconômica uma vez que são consumidos em quantidades significativas; os *commodities* destinam-se a usos genéricos, sem carecer de alta tecnologia ou propriedades avançadas e distintivas [4, 5, 51, 52, 53].

A prevalência de polímeros na forma de sacos, filmes e recipientes baseados em misturas, blendas e compósitos para transporte, manejo e armazenamento alimentício suscita investigações sobre a migração de compostos para os alimentos, com destaque para o estudo de microplásticos, monômeros e oligômeros que podem se desprender da estrutura da embalagem e interagir com o seu conteúdo e com o ambiente. As autoridades regulatórias globais como Food and Drug Administration (FDA) nos Estados Unidos, a European Medicines Agency (EMA) na União Europeia, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) no Brasil e a Administração Nacional de Medicamentos, Alimentos e Tecnologia Médica (ANMAT) na Argentina, estabelecem limites de migração para garantir a segurança nesse contexto. Ainda assim, condições pontuais e extremas de temperatura, pH e umidade podem levar à fragmentação e degradação acelerada dos polímeros, impactando o meio ambiente e a saúde humana de forma mais direta. A liberação de substâncias tóxicas pode ocorrer também em certas circunstâncias, como durante a queima de plásticos, resultando em emissões de gases prejudiciais à fauna e à flora. Além disso, quando a degradação plástica leva à formação de micropartículas e nanopartículas que vão sendo ingeridas por organismos vivos, esta questão representa um grande desafio ambiental e de saúde pública. Polímeros amplamente empregados, como o polietileno e o polipropileno, exibem baixa toxicidade intrínseca quando isolados e não submetidos a calor extremo, mas a presença de corantes, cargas e resíduos de monômeros pode introduzir elementos fatais na sua equação de risco, especialmente quando o modo de uso e descarte não são devidamente gerenciados [18, 35, 51, 52].

Compreende-se, portanto, que a possível toxicidade dos materiais baseados em polímeros é influenciada não só pela composição da matriz e pelos aditivos utilizados durante a fabricação. A avaliação do risco intrínseco a cada material e a previsão dos possíveis riscos associados ao seu uso depende também das condições específicas de aplicação - como tempo, modo e intensidade de uso - além do ambiente de descarte. A saber, produtos plásticos como mamadeiras, brinquedos, garrafas e até revestimento de latas de alimentos baseados em policarbonatos e resinas epóxi apresentam risco primário relacionado ao seu uso e descarte indevido (principalmente envolvendo queima ou exposição à radiação e calor excessivo). A liberação de substâncias utilizadas como plastificantes ou intermediários na produção de artefatos, como os ftalatos (BBPs) e o bisfenol A (BPA) é um dilema



uma vez que estes representam potenciais disruptores endócrinos, também relacionados à obesidade, asma, diabetes tipo II, doenças cardiovasculares, e têm sido associados a efeitos adversos na saúde reprodutiva de adultos e a impactos no desenvolvimento neurológico e comportamental de crianças e adolescentes (como déficit de atenção, hiperatividade e distúrbios dentro do espectro do autismo), configurando riscos tanto para a saúde humana quanto para o meio ambiente, sobretudo os seres marinhos [54, 55, 56].

Portanto, embora a maioria dos demais polímeros *commodities* seja considerada inerte (ou seja, não reage espontaneamente com uma gama de materiais cotidianos) e até mesmo a ingestão de microplásticos possa ser considerada inofensiva, essa inércia relativa definitivamente não implica na ausência total de possíveis efeitos indesejados, especialmente após a destinação indevida de lixo plástico para ecossistemas complexos como rios, lagos, oceanos e aterros sanitários. Além disso, a poluição ambiental proveniente da dispersão e acumulação de toneladas de resíduos plásticos torna-se cada vez mais uma preocupação mundial, com potenciais impactos negativos em ecossistemas aquáticos e terrestres. Os polímeros de síntese biológica ou fonte natural e renovável se mostram uma opção mais viável quando se pensa em relação à sustentabilidade e possível toxicidade. Porém, suas propriedades mecânicas e elevado custo muitas vezes acarretam em inviabilidade técnica e econômica. Assim, se faz necessário repensar e equilibrar seu uso no cotidiano, considerando a conciliação da boa gestão de polímeros *commodities*, reutilização e reciclagem, pois mesmo que muitos biopolímeros e polímeros biodegradáveis pareçam apresentar um risco menor aos ecossistemas, caso seu manejo e descarte não sejam feitos de forma correta, sua degradação é afetada (ou até impossibilitada) e ainda pode haver uma contaminação humana e ambiental, sobretudo em função dos demais componentes acrescidos em sua formulação [12, 18, 36, 38, 57].

Assim, apesar de muitos estudos estarem em andamento para compreender global e especificamente os impactos associados aos polímeros, é evidente que o tema é dinâmico e sujeito a constantes revisões. A pesquisa contínua e a implementação de regulamentações eficazes são cruciais para minimizar os riscos e danos associados a estes materiais. A gestão adequada dos polímeros, desde sua produção até seu descarte, é crucial para mitigar os seus possíveis impactos negativos e otimizar suas aplicações benéficas, buscando um equilíbrio sustentável entre os benefícios e os desafios associados a esses materiais.

## 1.7 IMPLICAÇÕES SOCIAIS E ASPECTOS ECONÔMICOS EM TORNO DO “PLÁSTICO”

A presença de materiais plásticos na sociedade humana atingiu um patamar elevadíssimo nos últimos anos e já está alterando significativamente a maneira como a sociedade e a economia se desenvolvem. O modelo cultural consumista difundido atualmente está constantemente relacionado à produção global massiva de resíduos, decorrente da busca contínua pelo consumo de objetos fúteis e



de rápida obsolescência, causando uma perda grave e acelerada de recursos naturais, além do acúmulo de lixo, especialmente de natureza polimérica, em locais inapropriados. Isso indica que, apesar do papel dos resíduos plásticos na problemática ambiental, o aspecto cultural é o principal motivador para essa realidade, associado à aplicação excessiva e desnecessária de embalagens e outros descartáveis [38, 58, 59].

A gestão do ciclo de vida do plástico requer uma abordagem abrangente que englobe educação e conscientização. A sociedade precisa compreender não apenas os impactos negativos do uso desenfreado do plástico, mas também a importância do descarte responsável e da reciclagem. E os governos desempenham um papel crucial na implementação de políticas públicas voltadas para esta questão. Programas e campanhas educacionais são vitais para promover a conscientização desde a infância, enfatizando a necessidade de redução do consumo, práticas de descarte adequadas e a valorização da reciclagem como um meio eficaz de reduzir a pegada ambiental. Além disso, os governos têm o papel de estabelecer regulamentações e incentivos mais eficazes, que de fato favoreçam práticas empresariais sustentáveis e a promoção da responsabilidade estendida do produtor [18, 36, 59, 60].

Num âmbito geral, os líderes mundiais vêm escapando do discurso que culpabiliza a ação dos consumidores pelas empresas e vêm buscando impor maior ação e responsabilidade às mesmas, com a proposta de aplicação de logística reversa para que elas, munidas do conhecimento de processamento de seus materiais, possam dar fim adequado aos produtos, através da aplicação de uma rede doméstica de retorno. Tais políticas não isentam a sociedade da necessidade de maior educação quanto ao assunto, pois independente da qualidade da malha de logística reversa, a cooperação ativa da população se fará sempre necessária [59, 60, 61].

A atuação de catadores de lixo em países em desenvolvimento, revela uma situação de disparidade social que estimula um trabalho informal de reciclagem, atenuando os impactos do lixo plástico, uma vez que não só redireciona o material, conduzindo-o à cadeia de reciclagem a qual já deveria ter sido inserido, mas também transforma-o em fonte de renda e subsídio para pessoas menos abastadas. Atualmente, muitos países vêm buscando organizar e refinar a atuação desses indivíduos, para proporcionar-lhes melhores condições de vida e para que possam causar um impacto positivo ainda maior na questão da absorção de recursos reaproveitáveis infortunadamente banalizados como lixo comum [36, 38, 42].

A taxa global de reciclagem de plásticos atingiu índices inferiores a 10 % em 2022, destacando a necessidade de esforços adicionais para promover práticas sustentáveis e reduzir o impacto ambiental do descarte inadequado. Um aumento no volume total de material reciclado nas atuais condições socioeconômicas, no entanto, tem sua força reduzida pela realidade do custo-benefício do reciclado. Em boa parte das indústrias que utilizam um material base que pode ser substituído pelo material reciclado, a diferença de custos de aquisição e de adequação do processo não tende a se revelar



significativa o bastante para que a transição seja vista como favorável. Sendo assim, o peso socioeconômico dos polímeros não permite que a reciclagem se consolide como uma alternativa viável de forma abrangente, além da reciclagem em escala doméstica. O desafio reside na necessidade de desenvolver estratégias econômicas que tornem a adoção do material reciclado mais atrativa para as grandes indústrias, promovendo a redução dos impactos ambientais sem comprometer a eficiência e a competitividade no mercado. Portanto, é imperativo investir em pesquisas e inovações que visem não apenas aprimorar as tecnologias de reciclagem, a fim de reduzir os custos associados, alinhando os benefícios ambientais às demandas econômicas e, assim, possibilitando uma transição efetiva para práticas mais sustentáveis [36, 47, 49, 60, 62, 63, 64].

O desenvolvimento de materiais plásticos biodegradáveis, partículas nanodimensionadas e compósitos com base em nanotecnologia representa uma fronteira promissora na área biomédica, têxtil, eletrônica, de segurança alimentar e produtos cotidianos em geral, buscando alternativas multifacetadas, com aplicações mais efetivas e ecologicamente mais amigáveis diante dos polímeros convencionais. No entanto, o custo associado a esses materiais com inovação e maior grau de tecnologia agregada ainda é um desafio, dificultando sua adoção em larga escala e, por vezes, tornando-os inacessíveis para determinados setores da população até que sua venda seja barateada<sup>[12]</sup>, [15, 32, 33, 34, 65, 66, 67].

Do ponto de vista social, sobretudo as comunidades mais pobres enfrentam com maior gravidade desafios relacionados aos polímeros, como a falta de acesso aos recursos avançados para saúde coletiva e segurança alimentar; e a poluição ambiental decorrente do uso e descarte inadequado de materiais já popularizados, que se depositam em lixões e aterros na maioria das vezes estrategicamente posicionados em subúrbios e áreas marginalizadas. Os moradores de rua e indivíduos mais carentes são os mais afetados pelas questões sanitárias relacionadas ao setor plástico - doenças oriundas do acúmulo de lixo e falta de acesso a materiais plásticos básicos (roupas, máscaras, absorventes, fraldas, louças descartáveis *etc*), sobretudo vivendo em condições precárias de saneamento básico. Portanto, a implementação de políticas públicas que incentivem práticas sustentáveis, bem como a criação de infraestrutura para a popularização dos materiais plásticos básicos e avançados, da coleta seletiva e da reciclagem, são fundamentais para abordar essas questões sociais [37, 44, 52, 59, 61].

Em suma, a questão do plástico envolve uma interconexão complexa entre fatores econômicos, sociais e ambientais. A busca por soluções eficazes exige uma abordagem holística, integrando inovações tecnológicas, educação e políticas públicas que visem a um equilíbrio entre o bem-estar social, desenvolvimento econômico e a preservação ambiental.



## 1.8 NORMAS E CERTIFICAÇÕES EM POLÍMEROS MAIS “VERDES”

A definição de “polímero verde” não é tida como consenso, mas, em geral, um material é denominado “verde” comparativamente - quando é considerado mais sustentável que um material análogo, em relação a um ou mais aspectos - matérias-primas, adjuvantes usados na síntese e processamento, gasto energético associado à produção, reciclagem ou degradabilidade [68]. Portanto, mesmo que um polímero seja hoje nomeado como “verde” por um autor, ele ainda é passível de gerar resíduos e poluição ao longo de todo o seu ciclo de vida e provavelmente ainda pode ser otimizado.

Polímeros biodegradáveis podem ser considerados verdes, pois não persistem na natureza; em condições ideais, são decompostos por seres vivos, reduzindo-se a substâncias mais simples, como água, dióxido de carbono e biomassa, que se reintegram ao meio ambiente. A adesão, combinação e transição gradual para polímeros biodegradáveis levanta desafios em termos de regulamentação e padronização. Estabelecer normas consistentes é essencial para garantir que os polímeros biodegradáveis atendam às expectativas em relação à sua aplicação, degradação e segurança [12, 15, 32, 68].

As normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) evoluem e se adaptam ao longo do tempo. Ademais, normas locais podem ser desenvolvidas para complementar as regras nacionais e atender às necessidades ambientais e industriais específicas. No entanto, dentre as normas atuais relacionadas à sustentabilidade em polímeros, aplicadas em território nacional, destacam-se:

- a) ABNT NBR ISO 14001: define os requisitos para sistemas de gestão ambiental e pode ser aplicada a empresas que produzem polímeros sustentáveis.
- b) ABNT NBR ISO 14044: trata da avaliação do ciclo de vida de produtos, incluindo polímeros, para avaliar seu impacto ambiental.
- c) ABNT NBR 15575: especifica os requisitos para o desempenho de edifícios habitacionais e pode ser relevante para a construção de edifícios que incorporem materiais poliméricos sustentáveis.
- d) ABNT NBR 15448: define os requisitos para a rotulagem ambiental de produtos, o que pode ser relevante para polímeros sustentáveis que desejam obter certificações de rótulos ecológicos.
- e) ABNT NBR 16173: estabelece diretrizes para a gestão da responsabilidade social em organizações e pode ser aplicada a empresas que produzem polímeros sustentáveis.

A norma internacional genericamente utilizada para avaliar a biodegradabilidade de produtos e materiais diversos é a ISO 14855, também conhecida como "Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium - Method by analysis of evolved carbon dioxide." Esta norma especifica métodos para avaliar a biodegradabilidade aeróbica de materiais



plásticos em meio aquoso. Ela aborda procedimentos para determinar a quantidade de dióxido de carbono liberada durante a biodegradação de amostras sob condições controladas. Não há, ainda, uma diretriz internacional única e unanimemente aceita exclusivamente para polímeros biodegradáveis e seus produtos finais. Os empresários e os autores de estudos e inovações poliméricas usam as normas de biodegradabilidade de acordo com seu contexto e necessidade, selecionando pontos específicos ou combinando tópicos de maior relevância de várias normas para que se aborde na íntegra todos os aspectos necessários ao tema. A seguir, estão listadas algumas das normas e certificações internacionais mais relevantes:

- f) EN 13432 (Europa) - estabelece os requisitos para embalagens compostáveis e biodegradáveis. Define critérios para a biodegradação, desintegração, qualidade do composto e impacto ambiental dos produtos compostáveis.
- g) ASTM D6400 e ASTM D6868 (Estados Unidos) - abordam os requisitos para produtos plásticos biodegradáveis e compostáveis.
- h) ISO 17088 - fornece diretrizes para a determinação da biodegradabilidade e desintegração de polímeros sob condições controladas de compostagem.
- i) Certificação OKCompost (concedida pelo TÜV Austria) - indica a compostabilidade de produtos e embalagens, incluindo polímeros biodegradáveis.
- j) Certificação Seedling (concedida pelo Din Certco) - indica que um produto é compostável de acordo com a EN 13432.

Exemplos notáveis de polímeros verdes incluem o PLA (poli (ácido láctico)), obtido a partir de amido de milho ou cana-de-açúcar, sendo biodegradável e comumente usado em embalagens e produtos descartáveis. Os PHAs (polihidroxialcanoatos), produzidos por bactérias através da fermentação de açúcares, são totalmente biodegradáveis e encontram aplicação em uma variedade de produtos plásticos. O PBS (Ácido Polibutírico) é outro polímero verde biodegradável, muitas vezes originado de fontes renováveis como a cana-de-açúcar e utilizado em embalagens. O PEF (Polietileno Furanoato), derivado de biomassas vegetais, é considerado uma alternativa mais sustentável ao PET e utilizado em embalagens de bebidas. Esses exemplos representam a diversidade de polímeros verdes que buscam reduzir a pegada ambiental da indústria de polímeros tradicionais [12, 15, 32, 68].

## 1.9 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DE POLÍMEROS

O ciclo de vida mostra as etapas que o produto ou material passa em todo seu processo, desde a obtenção da matéria prima até sua produção, aplicação final e chegando no descarte, avaliando o impacto que cada fase tem e possibilitando avaliar e tomar decisões sobre sustentabilidade relacionada a aquele produto [69].



A Análise de Ciclo de Vida (ACV) emerge como uma ferramenta fundamental na avaliação de polímeros, destacando-se como uma abordagem sistemática para mensurar os impactos ambientais ao longo de todas as fases do ciclo de vida de um produto. No contexto dos polímeros, que desempenham um papel essencial na indústria moderna, a ACV oferece uma perspectiva holística, desde a extração de matérias-primas até a disposição final do produto, levando em conta fatores como demanda quantitativa e energética, fonte de obtenção, biodegradabilidade e reciclabilidade. Esse enfoque abrangente permite a identificação de pontos críticos no ciclo de vida dos polímeros, contribuindo para a otimização de processos e a redução de impactos ambientais [60, 69].

O processo de ACV compreende quatro etapas fundamentais. Na primeira etapa - definição de objetivos e escopo - são estabelecidos os propósitos da análise, delineando-se a extensão do estudo e identificando os limites do sistema, bem como as funções principais do produto em análise. Em seguida, a etapa de inventário do ciclo de vida envolve uma compilação minuciosa de todos os insumos e emissões associados ao ciclo de vida do produto. Essa fase abrange a coleta de dados relacionados a matérias-primas, energia, transporte e processos industriais, proporcionando uma visão abrangente das entradas e saídas do sistema. A terceira etapa, avaliação de impacto ambiental, traduz os dados do inventário em impactos ambientais, considerando diversas categorias, como consumo de recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar e da água. O uso de modelos matemáticos e indicadores específicos auxilia na quantificação desses impactos. Por fim, a etapa de interpretação dos resultados visa analisar os resultados à luz dos objetivos e escopo definidos, destacando áreas críticas e identificando oportunidades de melhoria. Essa interpretação orienta a tomada de decisões visando a mitigação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do produto, contribuindo para práticas mais sustentáveis [60, 62, 63, 69].

A ACV de polímeros considera, portanto, aspectos importantes como a energia incorporada nos diferentes estágios de produção, as emissões de gases de efeito estufa, a geração de resíduos sólidos e líquidos, bem como outros indicadores ambientais relevantes. A comparação entre diferentes polímeros através da ACV proporciona uma base sólida para a tomada de decisões sustentáveis na seleção e desenvolvimento destes materiais, considerando não apenas as propriedades físicas e mecânicas, mas também os impactos associados. Essa abordagem proativa é essencial na busca por soluções que minimizem a pegada ambiental da produção de polímeros, promovendo a transição para práticas mais sustentáveis [62, 69].

No entanto, desafios persistentes na ACV de polímeros incluem a complexidade das cadeias de suprimentos globais e a variação nas práticas de produção entre diferentes regiões. Além disso, a incorporação de fatores sociais na avaliação ainda é uma área em desenvolvimento, visando uma visão mais completa da sustentabilidade dos polímeros. A superação desses desafios requer colaboração



entre a indústria, pesquisadores e formuladores de políticas para desenvolver diretrizes e padrões que promovam uma ACV robusta e equitativa para os polímeros [60, 62, 63, 69].

## 1.10 DESAFIOS NO USO DE POLÍMEROS

A utilização dos polímeros é um grande desafio, pois é necessário uma avaliação de todo seu processo de produção para sempre visar uma melhor eficiência com baixo impacto ambiental, como também uma conscientização para as pessoas que os utilizam [60, 63].

Para uma melhor eficiência, avaliar e melhorar etapas do seu processo de produção é essencial, já que é possível minimizar efeitos como desperdício, uso de componentes tóxicos, reduzir gasto de energia e emissões de gases estufas e assim mitigar o impacto ambiental associado com essas práticas. E isso tudo se torna possível com estudos sobre tecnologias e otimização de processos, desenvolvendo formas mais sustentáveis para sua produção ou até mesmo em relação a sua matéria prima, encontrando alternativas mais ecoeficientes [60, 63, 69].

Apesar da melhoria dos processos serem um grande passo que nos aproximamos mais para o caminho da sustentabilidade, apenas otimizar a produção e descarte de forma industrial não é suficiente, é necessário também a conscientização das pessoas como um todo de que é necessário ter uma melhor educação ambiental. Promoção de práticas como o uso responsável, descarte de forma correta, consumo consciente e reutilização torna mais possível tornar o ciclo de vida desse material mais sustentável [70].

A junção dessa otimização de processo, a conscientização de um melhor uso para esse material e a implementação da infraestrutura necessária de reciclagem é um passo de extrema importância para lidar com os desafios no uso dos polímeros. A colaboração entre esses pilares se torna essencial para mudar significativamente as práticas do uso, tornando-as mais sustentáveis e garantindo a preservação humana e ambiental.

Ademais, a nanotecnologia também emerge como uma ferramenta promissora para impulsionar a sustentabilidade no âmbito dos polímeros. Ao adicionar partículas em escalas nanométricas, é possível alcançar a modificação controlada das propriedades dos polímeros, conferindo-lhes características aprimoradas de desempenho e sustentabilidade. A utilização de nanopartículas em polímeros pode melhorar sua resistência mecânica, durabilidade e até mesmo torná-los mais leves, reduzindo assim o consumo de recursos. Além disso, a nanotecnologia oferece oportunidades para a criação de polímeros biodegradáveis mais eficientes, contribuindo para mitigar o problema dos resíduos plásticos persistentes. A capacidade de desenvolver nanomateriais mais eficientes em termos de energia e recursos abre portas para processos de produção mais sustentáveis, ao mesmo tempo em que aprimora as propriedades dos polímeros, proporcionando soluções inovadoras e ecológicas para os desafios enfrentados pela indústria de polímeros [50, 52, 65, 67, 71].



## 1.11 ECONOMIA CIRCULAR E OS MATERIAIS POLIMÉRICOS

Em tempos de mudanças sociais na busca pela sustentabilidade, o conceito de economia circular vêm sendo empregado como uma forma de auxiliar nas questões dos materiais poliméricos. O termo economia circular é costumeiramente atribuído a Pearce e Turner (1990), numa publicação onde expõem a ideia de um modelo econômico que desafia o modelo linear atual, um que toma conceitos de conservação da física e busca aplicar no âmbito socioeconômico, de forma que, em resumo, economia circular trata-se de um sistema no qual cada fim de processo é o começo de um processo seguinte, estendendo a aplicação do que é produzido ao máximo possível, integrando atos e consciência social para a manutenção do sistema, assim reduzindo a exploração de recursos naturais e o volume de lixo <sup>[37, 44]</sup>.

Quando trazemos o escopo do conceito para os materiais poliméricos, os desafios já expostos quanto à educação ambiental se mostram novamente relevantes, considerando a necessidade de adequada integração socioambiental, e o descarte adequado. E, ainda que a questão social fosse adequadamente aplicada, há a necessidade de se criar processos e materiais adequados para a manutenção desse tipo de modelo. Essa necessidade vem sendo endereçada com uma nova forma de pensar o processo de pesquisa e desenvolvimento de polímeros. Com o *design* dos mesmos sendo feito com a economia circular em mente, avanços como a produção de polímeros virgens a partir de materiais renováveis ou recicláveis, coordenam-se com a preferência por energia de menor pegada carbônica, assim como a possibilidade de reinserir o produto ao ciclo econômico com a reciclagem <sup>[37, 38, 61]</sup>.

Outras abordagens à questão tentam alterar os processos de produção já conhecidos para a aquisição de qualidades sustentáveis ao produto final, como a proposta de alteração catalítica do polietileno que busca manter ao máximo suas propriedades mecânicas, mas permitir uma degradação para monômeros facilitada. Diante dessas inovações, espera-se que os polímeros de um modo geral sejam adequadamente reimaginados, ou que suas técnicas de aproveitamento, reciclagem, processamento, uso e descarte sejam renovadas para compor uma eventual condição sustentável <sup>[32, 40, 72]</sup>.

## 1.12 INOVAÇÕES NANOTECNOLÓGICAS EM PROL DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Como já mencionado, a nanotecnologia pode proporcionar grandes avanços para ajudar a preservar o meio ambiente, contornando diversos desafios na utilização de polímeros. A seguir, são ressaltados alguns dos principais potenciais benefícios da nanotecnologia, em prol do desenvolvimento sustentável <sup>[22, 23, 24, 25, 50, 52, 65, 67, 73, 74]</sup>.



- a) Prevenção de poluição ou danos indiretos ao meio ambiente: nanomateriais catalíticos podem ser usados para aumentar a eficiência e seletividade em processos industriais, o que resulta num maior aproveitamento de matérias primas, menor consumo de energia e menor quantidade de resíduos.
- b) Tratamento de poluentes: devido sua grande área superficial, as nanopartículas possuem propriedades de adsorção de metais e substâncias orgânicas. Por isso essas partículas podem ser usadas para remover tais substâncias. Propriedades redox ou semicondutoras podem ser usadas no tratamento de água e efluentes industriais, baseado na propriedade de degradação química ou fotoquímica de poluentes orgânicos.
- c) Detecção e monitoramento de poluentes: nanosensores são mais seletivos e mais sensíveis para a detecção e monitoramento de poluentes orgânicos e inorgânicos no meio ambiente. Esses avanços proporcionam melhor controle dos processos industriais e uma detecção mais precoce e precisa de contaminação no ambiente, nos alimentos e em outros produtos de uso humano.
- d) Uso de nanocompósitos: a criação de nanocompósitos é usada para modificar características dos materiais já existentes, por exemplo, incorporando cargas para aumentar a rigidez e a resistência de polímeros biodegradáveis, abrindo possibilidade para que estes possam ser usados no lugar dos polímeros convencionais.

A ponderação cuidadosa do uso de nanomateriais, em conformidade com os princípios da nanotoxicologia, é imperativa para garantir que os benefícios da nanotecnologia não sejam comprometidos por potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente. A nanotoxicologia é uma disciplina que investiga os efeitos adversos dos nanomateriais e, nesse contexto, sua aplicação em polímeros requer uma abordagem cautelosa. Ao utilizar nanocompósitos em polímeros para diversas aplicações, é crucial avaliar os potenciais efeitos tóxicos que as nanopartículas podem apresentar. Partículas nanométricas têm características únicas que podem influenciar sua interação com sistemas biológicos, levantando preocupações sobre possíveis impactos na saúde e no ambiente. Portanto, é essencial realizar estudos de nanotoxicidade específicos para os nanomateriais incorporados em polímeros, considerando aspectos como tamanho, forma, composição química e solubilidade [71, 75, 76].

A pesquisa em nanotoxicologia proporciona insights valiosos sobre os mecanismos de interação entre nanomateriais e organismos vivos, possibilitando o desenvolvimento de estratégias de mitigação de riscos. Uma potencial toxicidade deve ser cuidadosamente avaliada, com os mecanismos subjacentes esclarecidos. Para esse fim, diferentes abordagens podem ser utilizadas. Primeiramente, a toxicologia experimental, que consiste na realização de experimentos *in vitro* ou *in vivo* (incluindo estudos clínicos). Porém, são discutidas as vantagens e limitações respectivas dos modelos *in vitro* e *in vivo*, assim como algumas questões associadas à nanotoxicologia experimental. São também



propostas perspectivas de futuros desenvolvimentos no campo. Em segundo lugar, a nanotoxicologia computacional pode ser utilizada para prever a toxicidade dos nanomateriais. Estabelecer diretrizes regulatórias rigorosas e padrões de segurança é fundamental para garantir a aplicação segura da nanotecnologia em polímeros. Dessa forma, a ponderação cuidadosa do uso de nanomateriais, aliada a uma abordagem proativa na identificação e mitigação de riscos potenciais, é essencial para promover o avanço seguro e sustentável da nanotecnologia no campo dos polímeros [71, 75, 76, 77].

## 2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão aborda uma ampla gama de tópicos relacionados à sustentabilidade em materiais poliméricos, destacando conceitos fundamentais, desafios socioeconômicos e contribuições notáveis no campo da nanotecnologia. Ao explorar a história e classificações dos materiais poliméricos, ficou evidente o papel crucial desses materiais em nossa sociedade, tanto na indústria quanto em nosso cotidiano. As considerações sobre biodegradabilidade e reciclabilidade dos polímeros ressaltaram a importância de abordagens sustentáveis para enfrentar os impactos ambientais do plástico.

As implicações sociais e econômicas em torno do uso do plástico destacaram a necessidade de uma abordagem holística, que inclua educação, conscientização e políticas públicas para promover práticas mais sustentáveis. A discussão sobre normas e certificações em polímeros mais sustentáveis enfatizou o papel das regulamentações na orientação para soluções mais amigáveis ao meio ambiente. A discussão sobre análise de ciclo de vida proporcionou uma compreensão abrangente dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos polímeros, ressaltando a importância de decisões informadas e estratégias de gestão de resíduos. Os desafios no uso de polímeros foram reconhecidos, incentivando a busca contínua por alternativas mais sustentáveis.

Ao abordar a economia circular e sua relação com materiais poliméricos, ficou claro que a transição para práticas circulares é essencial para reduzir a dependência de recursos não renováveis. Por fim, as inovações nanotecnológicas foram destacadas como catalisadoras promissoras para o desenvolvimento sustentável, proporcionando avanços significativos na eficiência e nas propriedades dos materiais poliméricos.

É ressaltado que a aplicação da nanotecnologia em polímeros desempenha um papel crucial no tratamento de água e efluentes, oferecendo soluções inovadoras para otimizar a eficiência dos processos. A criação de nanocompósitos, resultantes da incorporação de nanopartículas em matrizes poliméricas, emerge como uma abordagem promissora para reduzir a demanda de materiais, minimizar custos e modular propriedades gerais, incluindo as relacionadas à degradação desses materiais. A presença de nanopartículas em polímeros utilizados em sistemas de tratamento de água pode aprimorar a adsorção de contaminantes, aumentando a eficiência na remoção de poluentes e contribuindo para



processos mais eficazes de purificação. Além disso, a resistência mecânica e a durabilidade dos polímeros são melhoradas, prolongando a vida útil dos materiais utilizados em equipamentos de tratamento de água e sistemas de gestão de efluentes. Assim, a sinergia entre nanotecnologia e polímeros abre perspectivas inovadoras para abordar desafios ambientais, promovendo práticas mais sustentáveis e eficientes no tratamento de recursos hídricos. E, em um cenário global que demanda soluções ambientalmente conscientes, a convergência de conhecimentos históricos, regulamentações rigorosas, inovações tecnológicas e esforços sociais é imperativa para moldar um futuro mais sustentável para os materiais poliméricos.



## REFERÊNCIAS

- Levitt, S. (1986). Manchester Mackintoshes: A History of the Rubberized Garment Trade in Manchester. *Textile History*, 17(1), 51–69. doi:10.1179/004049686793700980
- Utracki, L. A. (1995). History of commercial polymer alloys and blends (from a perspective of the patent literature). *Polymer Engineering and Science*, 35(1), 2–17. doi:10.1002/pen.760350103
- Jensen, W. B. (2008). The Origin of the Polymer Concept. *Journal of Chemical Education*, 85(5), 624. doi:10.1021/ed085p624
- Hage Jr., E.. (1998). Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. *Polímeros*, 8(2), 6–9. doi:10.1590/S0104-14281998000200003
- MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. *Introdução a polímeros*. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Blucher, 1999, 191. ISBN: 9788521202479
- Calzonetti, J. A., & Laursen, C. J. (2010). PATENTS OF CHARLES GOODYEAR: HIS INTERNATIONAL CONTRIBUTIONS TO THE RUBBER INDUSTRY. *Rubber Chemistry and Technology*, 83(3), 303–321. doi:10.5254/1.3525687
- Feldman, D. (2008). Polymer History. *Designed Monomers and Polymers*, 11(1), 1–15. doi:10.1163/156855508x292383
- Hemais, C. A.. (2004). Eloisa Mano e seus oitenta anos. *Polímeros*, 14(4), E4–E10. doi:10.1590/S0104-14282004000400003
- ., & Mendes, P. L. C.. (2015). LIÇÃO DE VIDA: 90 ANOS DA PROFESSORA ELOISA MANO. *Polímeros*, 25(1), E1–E1. doi:10.1590/0104-1428.2501
- Ding, Y., Kisliuk, A., & Sokolov, A. P. (2004). When Does a Molecule Become a Polymer? *Macromolecules*, 37(1), 161–166. doi:10.1021/ma035618i
- Rasmussen, S. C. (2018). Revisiting the Early History of Synthetic Polymers: Critiques and New Insights. *Ambix*, 1–17. doi:10.1080/00026980.2018.1512775
- Lenz, R.W. (1993). Biodegradable polymers. In: Langer, R.S., Peppas, N.A. (eds) *Biopolymers I. Advances in Polymer Science*, vol 107. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/BFb0027550
- Olatunji, O. (2016). Classification of Natural Polymers. In: Olatunji, O. (eds) *Natural Polymers*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-26414-1\_1
- Rehm, B. Bacterial polymers: biosynthesis, modifications and applications. *Nat Rev Microbiol* 8, 578–592 (2010). doi:10.1038/nrmicro2354
- Avérous, L., Pollet, E. (2012). Biodegradable Polymers. In: Avérous, L., Pollet, E. (eds) *Environmental Silicate Nano-Biocomposites. Green Energy and Technology*. Springer, London. doi:10.1007/978-1-4471-4108-2\_2
- Odian, G. G. (2004). *Principles of polymerization*. Wiley-Interscience. <https://www.wiley.com/en-us/Principles+of+Polymerization%2C+4th+Edition-p-9780471274001>



- Kariduraganavar, M. Y., Kittur, A. A., & Kamble, R. R. (2014). Polymer Synthesis and Processing. Natural and Synthetic Biomedical Polymers, 1–31. doi:10.1016/b978-0-12-396983-5.00001-6
- Geyer, R. (2020). Production, use, and fate of synthetic polymers. Plastic Waste and Recycling, 13–32. doi:10.1016/b978-0-12-817880-5.00002-5
- Advincula, R. C., Brittain, W. J., Caster, K. C., & Jürgen Rühle. (2004). Polymer Brushes. In Wiley eBooks. Wiley. doi:10.1002/3527603824
- Ramakrishna, S., Mayer, J., Wintermantel, E., & Leong, K. W. (2001). Biomedical applications of polymer-composite materials: a review. Composites Science and Technology, 61(9), 1189–1224. doi:10.1016/s0266-3538(00)00241-4
- Sequeira, C., & Santos, D. (2010). Polymer Electrolytes. Elsevier. ISBN: 9781845699772
- Jang, J. (2006 ). Conducting Polymer Nanomaterials and Their Applications. In: Emissive Materials Nanomaterials. Advances in Polymer Science, vol 199. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/12\_075
- Berbel Manaia, E., Paiva Abuçafy, M., Chiari-Andréo, B. G., Lallo Silva, B., Oshiro-Júnior, J. A., & Chiavacci, L. (2017). Physicochemical characterization of drug nanocarriers. International Journal of Nanomedicine, Volume 12, 4991–5011. doi:10.2147/ijn.s133832
- Rostamabadi, H., Falsafi, S. R., Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2020). Evaluating the structural properties of bioactive-loaded nanocarriers with modern analytical tools. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. doi:10.1111/1541-4337.12653
- Dima, C., Assadpour, E., Dima, S., & Jafari, S. M. (2020). Bioavailability of nutraceuticals: Role of the food matrix, processing conditions, the gastrointestinal tract, and nanodelivery systems. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. doi:10.1111/1541-4337.12547
- da Rocha, L. V. M., da Silva, P. S. R. C., & Tavares, M. I. B. (2023). Comparative Study Of Poly (Butylene Adipate Co-Terephthalate) Nanocomposites With Zinc And Molybdenum Oxides. Seven Editora, 218–224. doi:10.56238/methofocusinterv1-115
- Das, A., Ringu, T., Ghosh, S. et al. A comprehensive review on recent advances in preparation, physicochemical characterization, and bioengineering applications of biopolymers. Polym. Bull. 80, 7247–7312 (2023). doi:10.1007/s00289-022-04443-4
- Lucas, E. F. (2001). Caracterização de polímeros. Determinação de peso molecular e análise térmica. Rio De Janeiro: E-Papers. ISBN: 9788587922250
- Canevarolo, V. (2006). Ciência dos polímeros : um texto básico para tecnólogos e engenheiros. Artliber. ISBN: 978-8588098107
- Canevarolo, V. (2007). Técnicas de caracterização de polímeros. Artliber. ISBN: 978-8588098190
- Abang, S., Wong, F., Sarbatly, R., Sariau, J., Bains, R., & Besar, N. A. (2023). Bioplastic classifications and innovations in antibacterial, antifungal, and antioxidant applications. Journal of Bioresources and Bioproducts. doi:10.1016/j.jobab.2023.06.005



Rai, P., Mehrotra, S., Priya, S., Gnansounou, E., & Sharma, S. K. (2021). Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers. *Bioresource Technology*, 325, 124739. doi:10.1016/j.biortech.2021.124739

Zhang, Z., Ortiz, O., Goyal, R., & Kohn, J. (2014). Biodegradable Polymers. *Handbook of Polymer Applications in Medicine and Medical Devices*, 303–335. doi:10.1016/b978-0-323-22805-3.00013-x

Mangaraj, S., Yadav, A., Bal, L. M., Dash, S. K., & Mahanti, N. K. (2018). Application of Biodegradable Polymers in Food Packaging Industry: A Comprehensive Review. *Journal of Packaging Technology and Research*, 3(1), 77–96. doi:10.1007/s41783-018-0049-y

Zhang, K., Hamidian, A. H., Tubić, A., Zhang, Y., Fang, J. K. H., Wu, C., & Lam, P. K. S. (2021). Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution*, 274, 116554. doi:10.1016/j.envpol.2021.116554

Hamad, K., Kaseem, M., & Deri, F. (2013). Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. *Polymer Degradation and Stability*, 98(12), 2801–2812. doi:10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025

Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature reviews. Materials*, 7(2), 117–137. doi:10.1038/s41578-021-00407-8

Kijo-Kleczkowska, A., & Gnatowski, A. (2022). Recycling of Plastic Waste, with Particular Emphasis on Thermal Methods—Review. *Energies*, 15(6), 2114. doi:10.3390/en15062114

Chanda, M. (2021). Chemical aspects of polymer recycling. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(3), 133–150. doi:10.1016/j.aiepr.2021.06.002

Brito, J., Andrianov, A. K., & Sukhishvili, S. A. (2022). Factors Controlling Degradation of Biologically Relevant Synthetic Polymers in Solution and Solid State. *ACS Applied Bio Materials*, 5(11), 5057–5076. doi:10.1021/acsabm.2c00694

Spinacé, M. A. da S., & De Paoli, M. A. (2005). A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química Nova*, 28, 65–72. doi:10.1590/S0100-40422005000100014

Momanyi, J., Herzog, M., & Muchiri, P. (2019). Analysis of Thermomechanical Properties of Selected Class of Recycled Thermoplastic Materials Based on Their Applications. *Recycling*, 4(3), 33. doi:10.3390/recycling4030033

Momanyi, J., Herzog, M., & Muchiri, P. (2019). Analysis of Thermomechanical Properties of Selected Class of Recycled Thermoplastic Materials Based on Their Applications. *Recycling*, 4(3), 33. doi:10.3390/recycling4030033

Shanmugam, V., Das, O., Neisiany, R. E., Babu, K., Singh, S., Hedenqvist, M. S., ... Ramakrishna, S. (2020). Polymer Recycling in Additive Manufacturing: an Opportunity for the Circular Economy. *Materials Circular Economy*, 2(1). doi:10.1007/s42824-020-00012-0

Sasse, F., & Emig, G. (1998). Chemical Recycling of Polymer Materials. *Chemical Engineering & Technology*, 21(10), 777–789. doi:10.1002/(sici)1521-4125(199810)21:10<777::aid-ceat777>3.0.co;2-l

Francis, R. (Ed.). (2016). *Recycling of Polymers*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. ISBN:9783527689002. doi:10.1002/9783527689002



Ignatyev, I. A., Thielemans, W., & Vander Beke, B. (2014). Recycling of Polymers: A Review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579–1593. doi:10.1002/cssc.201300898

Khalid, M. Y., Arif, Z. U., Ahmed, W., & Arshad, H. (2022). Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 31. doi:10.1016/j.susmat.2021.e00382

Cruz Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Hoppe, S., & Camargo, M. (2017). Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. *Additive Manufacturing*, 17, 87–105. doi:10.1016/j.addma.2017.05.013

Bharadwaz, A., & Jayasuriya, A. C. (2020). Recent trends in the application of widely used natural and synthetic polymer nanocomposites in bone tissue regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, 110698. doi:10.1016/j.msec.2020.110698

Pack, E. C., Lee, K. Y., Jung, J. S., Jang, D. Y., Kim, H. S., Koo, Y. J., ... Choi, D. W. (2021). Determination of the migration of plastic additives and non-intentionally added substances into food simulants and the assessment of health risks from convenience food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 30, 100736. doi:10.1016/j.fpsl.2021.100736

Jadhav, E. B., Sankhla, M. S., Bhat, R. A., & Bhagat, D. S. (2021). Microplastics from food packaging: An overview of human consumption, health threats, and alternative solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100608. doi:10.1016/j.enmm.2021.100608

Hemais, C. A. (2003). Polymers and the automobile industry. *Polímeros*, 13(2), 107–114. doi:10.1590/S0104-14282003000200008

Fromme, H., Kuchler, T., Otto, T., Pilz, K., Müller, J., & Wenzel, A. (2002). Occurrence of phthalates and bisphenol A and F in the environment. *Water Research*, 36(6), 1429–1438. doi:10.1016/s0043-1354(01)00367-0

Stojanoska, M.M., Milosevic, N., Milic, N. et al. The influence of phthalates and bisphenol A on the obesity development and glucose metabolism disorders. *Endocrine* 55, 666–681 (2017). doi:10.1007/s12020-016-1158-4

Ferguson, K. K., Peterson, K. E., Lee, J. M., Mercado-García, A., Blank-Goldenberg, C., Téllez-Rojo, M. M., & Meeker, J. D. (2014). Prenatal and peripubertal phthalates and bisphenol A in relation to sex hormones and puberty in boys. *Reproductive Toxicology*, 47, 70–76. doi:10.1016/j.reprotox.2014.06.002

Jehanno, C., Alty, J.W., Roosen, M. et al. Critical advances and future opportunities in upcycling commodity polymers. *Nature* 603, 803–814 (2022). doi:10.1038/s41586-021-04350-0

Smith, O., Brisman, A. Plastic Waste and the Environmental Crisis Industry. *Crit Crim* 29, 289–309 (2021). doi:10.1007/s10612-021-09562-4

Dini, R. (2016). Consumerism, Waste, and Re-Use in Twentieth-Century Fiction. In Palgrave Macmillan US eBooks. doi:10.1057/978-1-137-58165-5

Davidson, M. G., Furlong, R. A., & McManus, M. C. (2021). Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126163. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126163



Shanmugam, V., Das, O., Neisiany, R.E. et al. Polymer Recycling in Additive Manufacturing: an Opportunity for the Circular Economy. *Mater Circ Econ* 2, 11 (2020). doi:10.1007/s42824-020-00012-0

Gu, F., Guo, J., Zhang, W., Summers, P. A., & Hall, P. (2017). From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of The Total Environment*, 601-602, 1192–1207. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.278

Aguilar-Hernandez, G. A., Rodrigues, J. F. D., & Tukker, A. (2020). Macroeconomic, social and environmental impacts of a circular economy up to 2050: A meta-analysis of prospective studies. *Journal of Cleaner Production*, 123421. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123421

Bing, X., Bloemhof-Ruwaard, J.M. & van der Vorst, J.G.A.J. Sustainable reverse logistics network design for household plastic waste. *Flex Serv Manuf J* 26, 119–142 (2014). doi:10.1007/s10696-012-9149-0

Martins, R., Luana Cristina Paludo, Pablo Monteiro Inocência, Viana, L., Caroline, Oscar, Evandro Roberto Alves, & Lins, T. (2023). Amoxicillin degradation by iron photonanocatalyst synthesized by green route using pumpkin (Tetsukabuto) peel extract. *Talanta*, 260, 124658–124658. doi:10.1016/j.talanta.2023.124658

Saleem, J., Shahid, U. B., & McKay, G. (2018). Environmental Nanotechnology. *Handbook of Environmental Materials Management*, 1–32. doi:10.1007/978-3-319-58538-3\_94-1

Hu, L., & Cui, Y. (2012). Energy and environmental nanotechnology in conductive paper and textiles. *Energy & Environmental Science*, 5(4), 6423. doi:10.1039/c2ee02414d

Mülhaupt, R. (2012). Green Polymer Chemistry and Bio-based Plastics: Dreams and Reality. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 214(2), 159–174. doi:10.1002/macp.201200439

Ciambrone, D. F. (2018). *Environmental Life Cycle Analysis*. CRC Press. doi:10.1201/9780203757031

Justice Kofi Debrah;Diogo Guedes Vidal;Maria Alzira Pimenta Dinis; (2021). Raising Awareness on Solid Waste Management through Formal Education for Sustainability: A Developing Countries Evidence Review . *Recycling*. doi:10.3390/recycling6010006

Sun, H. (2019). Grand Challenges in Environmental Nanotechnology. *Frontiers in Nanotechnology*, 1. doi:10.3389/fnano.2019.00002

Bohre, A., Jadhao, P. R., Tripathi, K., Pant, K. K., Likozar, B., & Saha, B. (2023). Chemical recycling processes of waste polyethylene terephthalate using solid catalysts. *ChemSusChem*. doi:10.1002/cssc.202300142

*Green and Sustainable Advanced Materials*. (2018). Wiley EBooks. doi:10.1002/9781119528463

Wiek, A., Foley, R.W., Guston, D.H. (2012). Nanotechnology for sustainability: what does nanotechnology offer to address complex sustainability problems?. In: Diallo, M.S., Fromer, N.A., Jhon, M.S. (eds) *Nanotechnology for Sustainable Development*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-05041-6\_30



Zielińska, A., Costa, B., Ferreira, M. V., Miguéis, D., Louros, J. M. S., Durazzo, A., Lucarini, M., Eder, P., V. Chaud, M., Morsink, M., Willemen, N., Severino, P., Santini, A., & Souto, E. B. (2020). Nanotoxicology and Nanosafety: Safety-by-Design and Testing at a Glance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13). doi:10.3390/ijerph17134657

Domingues, C., Santos, A., Alvarez-Lorenzo, C., Concheiro, A., Jarak, I., Veiga, F., Barbosa, I., Dourado, M., & Figueiras, A. (2022). Where Is Nano Today and Where Is It Headed? A Review of Nanomedicine and the Dilemma of Nanotoxicology. *ACS Nano*, 16(7), 9994–10041. doi:10.1021/acsnano.2c00128

Forest, V. (2022). Experimental and Computational Nanotoxicology - Complementary Approaches for Nanomaterial Hazard Assessment. *Nanomaterials*, 12(8), 1346. doi:10.3390/nano12081346