4º Congresso Internacional sobre Materiais Plásticos Compostáveis e de Fonte Renovável
11 e 12 de junho de 2025

ABORDAGENS PARA AVALIAÇÃO DA BIODEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS

ID.BIO.23

Fernanda Cauduro[1], Jordão Gheller Jr [2], Daniela Rodrigues Araujo [3], Bruno Felipe Bergel [4], Fernando Ludgero Spiekermann[5]

Instituto SENAI de Tecnologia Química & Meio Ambiente, São Leopoldo, Brasil, fernanda.cauduro@senairs.org.br
Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros, São Leopoldo, Brasil, jordao.gheller@senairs.org.br Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros, São Leopoldo, Brasil, daniela.araujo@senairs.org.br
Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros, São Leopoldo, Brasil, bruno.bergel@senairs.org.br
Instituto SENAI de Tecnologia Química & Meio Ambiente, São Leopoldo, Brasil, fernando.spiekermann@senairs.org.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma abordagem teórica sobre os principais métodos utilizados para avaliação da biodegradação de materiais poliméricos, com ênfase em sistemas de compostagem, além da caracterização de microplásticos como indicadores de degradação incompleta. A biodegradação é um processo mediado por microrganismos, que transformam compostos orgânicos complexos em estruturas mais simples, podendo levar à mineralização completa ou à formação de resíduos intermediários, como fragmentos poliméricos. Os sistemas de compostagem representam ambientes dinâmicos e biotecnologicamente ativos, utilizam resíduos orgânicos como substrato e operam sob temperaturas elevadas e intensa atividade microbiológica. Nestes ambientes, a biodegradação tende a ocorrer de forma mais rápida e eficiente, sendo monitorada por meio da análise de parâmetros físico-químicos, da integridade estrutural dos materiais, da presença de resíduos sólidos ao final do processo e de possíveis impactos negativos no processo de compostagem. Adicionalmente, a avaliação da formação de microplásticos constitui uma etapa crucial para compreender os impactos potenciais de materiais considerados “compostáveis” que, na prática,

podem apenas se fragmentar em partículas menores. A identificação e caracterização desses fragmentos são realizadas por técnicas como microscopia óptica e eletrônica, análise de tamanho por imageamento, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e Raman, que permitem distinguir polímeros sintéticos de origem natural ou petroquímica. Os resultados esperados dessas abordagens incluem a distinção entre materiais que sofrem degradação total, sem geração de resíduos persistentes, e aqueles que geram partículas microplásticas com potencial de acúmulo ambiental. Conclui-se que a análise integrada da biodegradabilidade e compostabilidade, associada à caracterização de microplásticos, representa uma estratégia robusta para avaliar o comportamento e o impacto ambiental de diferentes materiais poliméricos. Essa abordagem contribui para o desenvolvimento de produtos verdadeiramente sustentáveis, para a regulação técnica de rotulagem de biodegradabilidade e para o aprimoramento de políticas públicas voltadas à mitigação da poluição por plásticos.

Palavras-chave: Biodegradação, compostagem e microplásticos.

1. INTRODUÇÃO

O plástico, devido às propriedades como leveza, durabilidade, baixa toxicidade e custo acessível, tornou-se um dos materiais mais utilizados na sociedade atual, com aplicações que abrangem atividades industriais, comerciais e agrícolas. A produção global de plástico tem crescido exponencialmente, atingindo aproximadamente 400 milhões de toneladas métricas anualmente e com projeções de quase triplicar até 2060. Contudo, a produção em massa e o uso generalizado geram uma importante problemática ambiental: o acúmulo de resíduos plásticos. A maioria dos tipos de plástico convencionais não é degradável e persiste no ambiente por séculos, com cerca de 76% da produção total de plástico sendo descartada como resíduo, e uma parcela significativa (72%) acaba em aterros ou é liberada diretamente no meio ambiente. Essa realidade impõe ameaças aos ecossistemas naturais, à vida selvagem e à saúde humana [1].

Em atenção às questões ambientais, os bioplásticos — materiais de base biológica ou biodegradáveis — surgem como uma alternativa promissora. A capacidade de produção global de bioplásticos alcançou 1,8 milhão de toneladas em 2022, com expectativa de quadruplicar até 2028, indicando uma crescente aposta nesses materiais como parte da solução para a poluição plástica. No entanto, a eficácia da biodegradação de bioplásticos em ambientes naturais ainda é objeto de investigação, pois há uma lacuna considerável no conhecimento sobre como esses materiais se degradam em condições reais, especialmente quando incorporados em produtos comerciais [2-4].

A discrepância entre a vasta escala de produção e descarte de plásticos, tanto convencionais quanto os denominados "biodegradáveis", e a capacidade real do meio ambiente de assimilá-los, é um fator preocupante. A expectativa de que os bioplásticos sejam uma solução definitiva para a poluição deve ser vista com cautela, pois sua degradação completa não é garantida em todos os ambientes. Isso sugere que a inovação no desenvolvimento de materiais deve ser acompanhada por uma infraestrutura de gestão de resíduos robusta e uma compreensão aprofundada do comportamento dos materiais após o descarte. A simples substituição de plásticos convencionais por bioplásticos, sem um sistema de descarte e tratamento adequado, pode não resolver o problema da poluição.

Este artigo tem como objetivo fornecer uma revisão das abordagens para a avaliação da biodegradação de polímeros. Serão explorados os conceitos de biodegradabilidade e compostabilidade, os principais métodos de avaliação com ênfase em sistemas de

compostagem, além dos métodos para identificação e caracterização de microplásticos como indicadores de degradação incompleta.

2. REVISÃO TEÓRICA

2.1. Biodegradabilidade e Compostabilidade: Definições e Distinções

A degradação é definida como um processo irreversível que resulta em mudança significativa na estrutura de um material, manifestada pela perda de propriedades como integridade, massa molecular ou resistência mecânica ou por fragmentação. Este processo é influenciado por condições ambientais e ocorre em uma ou mais etapas ao longo do tempo [2].

A biodegradação é uma forma específica de degradação causada pela atividade biológica, principalmente por ação enzimática, que provoca uma alteração substancial na estrutura química de um material. A União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) define-a como a "quebra de uma substância catalisada por enzimas *in vitro* ou *in vivo*". A American Society for Testing and Materials (ASTM D883-17) a descreve como "plástico degradável" aquele em que a degradação resulta da ação de microrganismos que ocorrem naturalmente, como bactérias, fungos e algas. Metodologias de ensaio disponíveis em normas técnicas definem como biodegradáveis os materiais que apresentam pelo menos 90% de conversão do carbono orgânico presente em sua composição em dióxido de carbono e biomassa, seguida pela assimilação por microrganismos naturalmente disponíveis em condições ambientais normais, dentro de um período de cerca de seis meses [2, 5-7,9].

Dentro da biodegradação, distinguem-se a biodegradação aeróbia, que ocorre na presença de oxigênio, resultando principalmente na produção de dióxido de carbono e matéria orgânica estabilizada, e a biodegradação anaeróbia, que se dá na ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio, gerando principalmente metano, matéria orgânica estabilizada e dióxido de carbono [8].

Já compostabilidade é a propriedade de um material que permite sua compostagem. Plásticos compostáveis são definidos pela ASTM D6400 como aqueles que se degradam por processos biológicos durante a compostagem, produzindo dióxido de carbono, água, compostos inorgânicos e biomassa a uma taxa consistente com outros materiais compostáveis conhecidos, sem deixar resíduos visíveis, distinguíveis ou tóxicos. É fundamental entender que todos os plásticos compostáveis são, por definição, biodegradáveis, mas o inverso pode não ser verdadeiro [2, 9, 10].

A suscetibilidade de um material à biodegradação é influenciada por uma complexa interação de fatores. Os fatores bióticos incluem a presença de microrganismos adequados (bactérias, fungos, algas), suas enzimas e as vias metabólicas disponíveis. Os fatores do material incluem o tipo de polímero, copolímeros, peso molecular, cristalinidade, temperatura de fusão (Tm), temperatura de transição vítrea (Tg), área de superfície específica, hidrofobicidade, e presença de aditivos. Misturas de polímeros, funcionalização ou revestimentos podem otimizar propriedades mecânicas, mas também alterar a biodegradabilidade. As propriedades físico-químicas são alteradas durante o processamento, impactando a biodegradação, e regiões cristalinas são menos acessíveis às enzimas. Por fim, os fatores ambientais (abióticos), como o ecossistema (solo, mar), condições de compostagem (industrial, doméstica), digestão

anaeróbia, temperatura, umidade, luz UV, oxigênio, forças mecânicas e modificações químicas também desempenham um papel crucial nesse processo [2].

A ambiguidade da terminologia e a complexidade das definições criam um ambiente propício para o "greenwashing", onde produtos são comercializados como "verdes" sem que sua degradação real ou impacto ambiental sejam totalmente compreendidos ou comprovados. Os plásticos oxi-degradáveis, que prometem uma degradação acelerada, são um exemplo de como a falta de clareza pode levar a soluções que, na verdade, agravam o problema da poluição por microplásticos. Essa prática não apenas confunde os consumidores, mas também mina a confiança nas soluções sustentáveis e pode desviar a atenção de práticas de gestão de resíduos mais eficazes. A regulamentação e a certificação rigorosas são, portanto, essenciais para combater essa ambiguidade e garantir a transparência e a responsabilidade ambiental [2,6].

2.2. Estágios e Mecanismos da Biodegradação Microbiana

A biodegradação de materiais poliméricos sólidos é um processo complexo, que se desdobra em uma sequência de estágios interconectados. A eficiência da biodegradação depende da sinergia entre microrganismos, suas enzimas e as condições ambientais [1,2,7].

O processo inicia-se com a colonização, onde espécies microbianas aderem à superfície do plástico e dão origem a biofilmes. Esta adesão, facilitada pela produção de proteínas e polissacarídeos microbianos, causa danos significativos à superfície do polímero, penetrando em seus poros e alterando seu tamanho [1].

A seguir se inicia a biodeterioração, um estágio em que a atividade microbiana na superfície do plástico provoca degradação e altera propriedades físico-químicas. A penetração microbiana pode ser intensificada pela secreção de substâncias extracelulares que afetam as fases hidrofóbicas e hidrofílicas, promovendo o acúmulo de poluentes e o crescimento microbiano [1].

O terceiro estágio é a biofragmentação, ou despolimerização, um processo lítico essencial para a degradação de polímeros em monômeros, dímeros ou oligômeros. Os produtos da biodeterioração são atacados por enzimas extracelulares — principalmente hidrolases como lipases, cutinases e proteases — que hidrolisam e quebram o polímero em componentes de baixo peso molecular ou monômeros livres. Moléculas com peso molecular superior a 500-800 Da são geralmente grandes demais para atravessar as membranas celulares microbianas, tornando a biofragmentação uma etapa crítica para a assimilação. A síntese dessas enzimas microbianas é um processo que demanda tempo, e sua concentração aumenta progressivamente, cessando com o esgotamento do substrato, o que explica os longos períodos necessários para a degradação plástica [1-2].

Na sequência, ocorre a assimilação, onde os monômeros, agora em tamanho reduzido, são absorvidos pela célula microbiana e utilizados como fonte de carbono e energia, sendo convertidos em biomassa celular, dióxido de carbono (CO_2) ou metano (CH_4) e água. Alguns monômeros penetram na célula por meio de transportadores de membrana específicos [1,2].

Finalmente, a mineralização acontece concomitantemente com a assimilação, culminando na conversão da matéria orgânica em minerais através da excreção de metabólitos e moléculas simples. Este estágio produz CO_2 e H_2O em condições aeróbias, ou CO_2 e CH_4 em anaerobiose. A mineralização é o único estágio que confirma a biodegradação completa do material e é

tipicamente estimada por métodos respirométricos que monitoram a evolução desses gases [1,2,10].

A biodegradação, portanto, não é um processo linear ou simples, mas um mecanismo complexo onde a eficiência depende da interação sinérgica entre diversos fatores bióticos e abióticos. Projetar um "plástico biodegradável" não se limita à sua composição química, mas exige uma compreensão profunda de como essa composição interage com o ambiente. Isso implica que a engenharia de polímeros para biodegradação deve considerar não apenas a capacidade intrínseca de quebra do material, mas também sua atratividade e acessibilidade para os microrganismos, bem como o ambiente de descarte pretendido. A falha em qualquer um desses estágios pode comprometer a degradação completa e, consequentemente, levar à persistência de fragmentos, incluindo microplásticos.

2.3 Métodos de Avaliação da Biodegradação de Materiais Poliméricos com Ênfase em Sistemas de Compostagem

A avaliação da adequação de materiais poliméricos para descarte em ambientes de compostagem é um campo complexo e exige uma variedade de abordagens para capturar as múltiplas variáveis do processo de degradação. As metodologias variam desde observações macroscópicas até análises em nível molecular, visando garantir uma compreensão abrangente do comportamento do material em diferentes ambientes.

Os métodos para investigar a ocorrência do processo de biodegradação incluem abordagens macro e microscópicas, técnicas espectroscópicas e métodos respirométricos[7-10].

As observações macro e microscópicas constituem a etapa inicial de avaliação. Exames visuais permitem identificar mudanças macroscópicas na cor, transparência, aparência, tamanho e a formação de incrustações ou fragmentação do material. A quantificação da perda de massa ao longo do tempo é uma técnica que pode ser empregada para monitorar a degradação do material. Em um nível mais detalhado, técnicas de microscopia, como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Microscopia de Força Atômica (AFM), são empregadas para visualizar a degradação localizada na superfície do polímero, revelando detalhes como erosão, rachaduras, fraturas, rugas, furos, colonização microbiana e perda de aditivos que seriam imperceptíveis a olho nu [6].

As técnicas espectroscópicas fornecem informações sobre as mudanças químicas e estruturais em nível molecular. A Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é utilizada para detectar alterações moleculares, como a formação e o desaparecimento de grupos funcionais, a oxidação, a absorção de umidade, a quebra de ligações covalentes e a perda de aditivos. A Difração de Raios-X (XRD) é empregada para determinar o grau de cristalinidade de um material, permitindo o cálculo das porcentagens de domínios amorfos e cristalinos. A Ressonância Magnética Nuclear (RMN) pode ser aplicada para estudar a estrutura e composição de polímeros, indicando mudanças estruturais, como a quebra de ligações de carbono em cadeias laterais e na cadeia principal do polímero, bem como a incorporação de moléculas de oxigênio. Em filmes de misturas de polímeros, o estudo por RMN pode determinar se todos os polímeros estão degradando na mesma taxa [6].

Os métodos respirométricos, baseados na formação de gases, são essenciais para medir a taxa de biodegradação. Para a biodegradação aeróbica, monitora-se o aumento de CO_2 ou o consumo de O_2. Para a biodegradação anaeróbica, mede-se a produção de CH_4 e CO_2. Isso pode ser feito por meio de detectores de CO_2 que medem a atividade respiratória dos microrganismos, Cromatografia Gasosa (GC) para detectar e quantificar CO_2 e CH_4, ou titulação para medir a concentração de CO_2. A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) pode ser avaliada usando equipamentos que medem a pressão dentro do vaso. Para a degradação anaeróbica, o Potencial Bioquímico de Metano (BMP) é usado para estimar a evolução da biodegradação [6,9].

2.4 Normas Técnicas Vigentes para Avaliação em Compostagem Industrial

A padronização dos métodos de avaliação da biodegradação é essencial para garantir a comparabilidade dos resultados e a confiabilidade das alegações de biodegradabilidade. As principais agências de padronização incluem a International Organization for Standardization (ISO), o European Committee for Standardization (CEN), a American Society for Testing and Materials (ASTM), a Japanese Industrial Standards (JIS) e a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) [2].

No Brasil, a ABNT NBR 15448-2:2008 especifica os requisitos e métodos de ensaio para determinar a compostabilidade de embalagens plásticas, visando a valorização de resíduos pós-consumo. Esta norma define que os constituintes orgânicos significativos (presentes em mais de 1% em massa seca) tenham sua biodegradabilidade determinada, com um mínimo de 90% do carbono orgânico convertido a dióxido de carbono em até seis meses. Na avaliação da desintegração, espera-se que após 12 semanas de compostagem a massa de material remanescente maior que 2 mm seja inferior a 10% da massa original. Além disso, a norma estabelece requisitos para o impacto no processo de compostagem (germinação e biomassa vegetal >90% em relação ao composto de referência) e a qualidade do composto resultante, que deve atender aos regulamentos nacionais pertinentes. Os métodos de ensaio referenciados incluem ISO 14855 para biodegradação aeróbia, EN 14045 para desintegração e EN 13432 para impacto no processo de compostagem [9-12].

Normas internacionais relevantes para a compostagem industrial incluem:

● EN 13432:2000: Define os requisitos para embalagens recuperáveis por compostagem e biodegradação [12].

● EN 14045:2003: Avalia a desintegração de materiais de embalagem em testes práticos sob condições de compostagem definidas em escala piloto. O material de teste é misturado com resíduo orgânico fresco e submetido a compostagem espontânea por 12 semanas, com a desintegração avaliada por peneiramento e balanço de massa [11].

● ISO 16929:2021: Determina o grau de desintegração de materiais plásticos sob condições de compostagem definidas em um teste em escala piloto. Faz parte de um esquema geral para avaliação da compostabilidade industrial de plásticos definido pela ISO 17088. O procedimento envolve a mistura do material de teste com resíduo orgânico fresco para compostagem espontânea por 12 semanas, com monitoramento de temperatura, pH, umidade e

composição de gases. A desintegração é avaliada por peneiramento e massa seca total do resíduo remanescente [14,15].

● ISO 20200:2015: Avalia o grau de desintegração de materiais plásticos sob condições simuladas de compostagem em um teste em escala de laboratório. Este método utiliza condições controladas de temperatura (58°C), umidade (55%) e amostras pré-cortadas para otimizar o ambiente de desintegração.

● ASTM D6400:2023: é uma especificação para a rotulagem de plásticos projetados para serem compostados aerobicamente em instalações municipais ou industriais. Inclui análise elementar, testes de fitotoxicidade (germinação de plantas) e desintegração, exigindo que 90% do carbono orgânico seja convertido em CO_2 após 180 dias [8].

● ASTM D5338:15: Mede a biodegradação aeróbica de materiais plásticos sob condições controladas de compostagem.

Os testes padronizados são geralmente realizados em triplicata, utilizando o material alvo do estudo, material de referência (como celulose microcristalina), um controle negativo (como polietileno - PE) e um branco (apenas inóculo). As condições de temperatura são controladas, com padrões de compostagem aeróbica a 58 ± 2 °C, e anaeróbicos variando entre 32–39 °C (mesófilos) e 50–60 °C (termófilos). Critérios de aprovação ou reprovação são definidos por cada norma, incluindo tempo máximo e porcentagem de desintegração/biodegradação, e testes são invalidados se houver desvios significativos nos controles [2,10].

É importante ressaltar que as normas técnicas apropriadas para avaliar a biodegradação e a desintegração, com condições e critérios específicos, são projetadas para ambientes controlados de laboratório ou escala piloto, que tendem a otimizar a degradação e podem não corresponder totalmente aos ambientes naturais. Para obter-se uma avaliação assertiva da biodegradabilidade do material, torne-se fundamental simular diferentes aspectos ambientais e observar os critérios mais adequado ao destino pretendido de cada material [2-4, 6].

2.4 Aspectos do Descarte de Plásticos em Compostagem Industrial

Quando resíduos plásticos são destinados à compostagem é essencial garantir que, além de desintegrarem fisicamente, não deixem resíduos tóxicos que comprometam a qualidade do composto ou afetem negativamente organismos do solo. A desintegração por compostagem é um dos testes aplicados a materiais biodegradáveis, como descrito nas normas EN 13432 e ASTM D6400. No entanto, a desintegração visível de um material não implica necessariamente em sua completa biodegradação química, tão pouco assegura a ausência de efeitos adversos aos organismos do solo. Compostos intermediários ou aditivos presentes no material podem ser liberados durante a decomposição e afetar a microbiota do solo, plantas ou invertebrados, comprometendo a segurança do composto final [8,12,16].

Observados esses aspectos, a compostagem industrial é uma possível prática para promover o gerenciamento de resíduos plásticos biodegradáveis. É caracterizada por temperaturas termofílicas elevadas, geralmente entre 50-60°C. Este processo autotérmico passa por três estágios principais: mesofílico (25-40°C), termofílico (55-65°C) e maturação [4].

Estudos com bioplásticos em condições de compostagem industrial demonstram taxas de degradação consideravelmente mais altas em comparação com outros ambientes. Por exemplo, bioplásticos de ácido polilático (PLA) podem ser completamente degradados em 4-6 semanas em compostagem industrial. O poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalerato) (PHBV) pode perder 59% de sua massa em 186 dias a 40-63°C. No entanto, a biodegradabilidade de plásticos pode não ser adequada para compostagem doméstica devido às temperaturas relativamente baixas (picos abaixo de 35-40°C), que inibem a atividade de bactérias termofílicas [3,4].

Além da temperatura, a degradabilidade dos bioplásticos na compostagem varia com o conteúdo de plástico no composto, propriedades do plástico (composição química e cristalinidade) e condições de compostagem (relação carbono-nitrogênio e inóculo) [3,4].

Técnicas de caracterização química e morfológica como MEV, FTIR microscopia Raman, cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas e testes de ecotoxicidade representam recursos complementares para avaliação da qualidade do adubo composto formado, buscando evidenciar a ausência de efeitos deletérios durante e após o processo de compostagem [17].

2.5 Geração de Microplásticos a Partir do Descarte de Plásticos no Meio Ambiente

A ISO 24187 define microplástico como “qualquer partícula sólida de plástico insolúvel em água com dimensão entre 1µm e 5 mm”. A problemática da poluição por microplásticos (MPs) é um desafio ambiental que vem gerando crescente preocupação. Esses fragmentos minúsculos, que podem ser gerados a partir da degradação de plásticos maiores, representam uma ameaça significativa aos ecossistemas aquáticos e terrestres, à vida selvagem e, potencialmente, à saúde humana. Os MPs podem comprometer o sistema digestivo de animais, afetar o crescimento de plantas no ambiente, entre outros efeitos [4,13,18].

A formação de microplásticos ocorre durante o processo de degradação de plásticos, tanto convencionais quanto biodegradáveis. Antes da degradação completa, pequenos fragmentos plásticos, oligômeros e monômeros podem persistir no ambiente. Isso se deve principalmente à alteração das propriedades físicas dos polímeros durante a degradação, tornando-os mais propensos à fragmentação [13].

Embora as propriedades físicas dos MPs de plásticos biodegradáveis possam diferir das dos plásticos não biodegradáveis (sendo mais facilmente quebrados), estudos indicam que as diferenças nos efeitos biológicos entre MPs de plásticos biodegradáveis e não biodegradáveis são pequenas. Consequentemente, mesmo MPs de plásticos biodegradáveis também podem representar ameaças ao meio ambiente [13].

Portanto, se os plásticos, mesmo biodegradáveis, forem descartados de forma descontrolada no ambiente natural, ou se sua degradação completa em um período razoável não puder ser garantida, a acumulação de microplásticos será inevitável [13].

2.6 Caracterização e Identificação de Microplásticos em Solo e Ambientes de Compostagem

Mesmo em condições ótimas de compostagem industrial, a degradação incompleta de plásticos biodegradáveis pode levar à produção de MPs, o que representa riscos de contaminação agrícola e acumulação ambiental. A identificação e caracterização de microplásticos em matrizes ambientais complexas, como solo e composto, são etapas necessárias para entender sua distribuição e impacto. No entanto, essas metodologias enfrentam desafios [3].

Para amostras de solo e ar, os métodos de separação e quantificação de microplásticos geralmente envolvem a coleta cuidadosa dos detritos remanescentes. Para amostras de ar, os fragmentos e partículas são observados e contados manualmente em microscópio, com um limite de tamanho inferior de 50 µm. Para amostras de solo, a extração pode ser feita por digestão oxidativa, utilizando hidróxido de potássio (KOH) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como agentes oxidantes. Outra possibilidade é empregar o método de flotação seguida de filtração, um método eficaz para separar microplásticos mais leves de partículas de solo mais pesadas. Nesse caso, os microplásticos são observados, medidos e contados de forma semelhante às amostras de ar e confirmação da composição das partículas é realizada por técnicas como a microscopia Raman [3,13].

Esses métodos, no entanto, apresentam limitações. A observação visual, embora útil para uma confirmação qualitativa, não indica conclusivamente a ausência de MPs em todas as amostras, especialmente quando a cor do plástico é semelhante à do composto. Além disso, os métodos de extração de MPs convencionais que utilizam agentes oxidantes mostraram-se inadequados para MPs de biopolímeros por causarem degradação dos próprios fragmentos. Isso ressalta a necessidade de pesquisas para desenvolver técnicas de extração especificamente adaptadas para os MPs de biopolímeros, a fim de aprimorar a precisão da detecção e minimizar a degradação não intencional durante a extração [3].

3. CONCLUSÕES

A avaliação da biodegradação de polímeros é uma área de pesquisa e desenvolvimento de importância crescente, impulsionada pela necessidade de mitigar a poluição plástica global. Este estudo abordou aspectos inerentes à biodegradação dos plásticos, um processo complexo que depende das características e interações entre as propriedades intrínsecas do material, atividade microbiana e condições ambientais.

Os mecanismos de biodegradação microbiana, envolvendo estágios como colonização, biodeterioração, biofragmentação, assimilação e mineralização, destacam o papel central de microrganismos e suas enzimas. A eficácia da degradação é uma função da capacidade desses agentes biológicos de acessar e metabolizar o polímero, o que é diretamente influenciado pela estrutura química, cristalinidade e morfologia do material.

Apesar da existência de normas técnicas abrangentes (ISO, ASTM, EN, ABNT) para avaliar a biodegradação e desintegração em ambientes controlados, é importante considerar os cenários de descarte e definir os métodos mais apropriados a cada finalidade. Além disso, é essencial incorporar a preocupação com a degradação incompleta dos plásticos, a fim de obter

dados que possibilitem uma correlação robusta entre os resultados obtidos em laboratório e o desempenho real dos materiais no ambiente.

O problema da geração de microplásticos a partir da degradação incompleta de plásticos, tanto convencionais quanto biodegradáveis, é uma preocupação crescente. Esses fragmentos persistem no ambiente e podem ter impactos ecológicos adversos. As metodologias atuais para identificação e caracterização de microplásticos em matrizes complexas, como solo e composto, enfrentam desafios, especialmente devido à dificuldade de extrair MPs de biopolímeros sem causar sua degradação.

A análise integrada da biodegradabilidade e compostabilidade, associada à caracterização de microplásticos, representa uma estratégia robusta para avaliar o comportamento e o impacto ambiental de diferentes materiais poliméricos. Essa abordagem contribui para o desenvolvimento de produtos verdadeiramente sustentáveis, para a regulação técnica de rotulagem, para garantir que as alegações de biodegradabilidade sejam transparentes e baseadas em evidências científicas robustas. Promover a discussão desses aspectos é fundamental para transformar a promessa da biodegradação em uma ferramenta verdadeiramente eficaz na gestão sustentável dos resíduos poliméricos e para o aprimoramento de políticas públicas voltadas à mitigação da poluição por plásticos.

4. REFERÊNCIAS

[1] ALI, S. S.; ELSAMAHY, T.; KOUTRA, E.; KORNAROS, M.; EL-SHEEKH, M.; ABDELKARIM, E. A.; ZHU, D.; SUN, J. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. Science of the Total Environment, v. 771, p. 144719, 2021.

[2] GARCÍA-DEPRAECT, O.; BORDEL, S.; LEBRERO, R.; SANTOS-BENEIT, F.; ARAGÃO BÖRNER, R. O.; BÖRNER, T.; MUÑOZ, R. Inspired by nature: Microbial production, degradation and valorization of biodegradable bioplastics for life-cycle-engineered products. Biotechnology Advances, v. 53, p. 107772, 2021.

[3] AFSHAR, S. V.; BOLDRIN, A.; CHRISTENSEN, T. H.; CORAMI, F.; DAUGAARD, A. E.; ROSSO, B.; HARTMANN, N. B. Disintegration of commercial biodegradable plastic products under simulated industrial composting conditions. Scientific Reports, v. 15, n. 8569, 2025.

[4] NIU, Y.; PAN, F.; SHEN, K.; YANG, X.; NIU, S.; XU, X.; ZHOU, H.; FU, Q.; LI, X. Status and Enhancement Techniques of Plastic Waste Degradation in the Environment: A Review. Sustainability, v. 16, n. 21, p. 9395, 2024.

[5] IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk. ISBN 0-9678550-9-8. https://doi.org/10.1351/goldbook ASTM D883-17

[6] SILVA, R. R. A.; MARQUES, C. S.; ARRUDA, T. R.; TEIXEIRA, S. C.; DE OLIVEIRA, T. V. Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. Macromolecules, v. 3, n. 2, p. 371-399, 2023.

[7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15448-1: Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis - Parte 1: Terminologia. Rio de Janeiro, 2008.

[8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D6400: Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities. United States, 2023.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15448-2: Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis - Parte 2: Biodegradação e compostagem - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

[10] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14855 – 1: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under composting conditions – Method by analysis of evolved carbon dioxide – Part 1: General method. Switzerland, 2012.

[11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN EN 14045: Packaging - Evaluation of the disintegration of packaging materials in practical oriented tests under defined composting conditions. Berlin, 2003.

[12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. EN 13432: Requirements for packing recoverable through composting and biodegradation. Berlin, 2000.

[13] LIAO, J.; CHEN, Q. Biodegradable plastics in the air and soil environment: Low degradation rate and high microplastics formation. Journal of Hazardous Materials, v. 418, p. 126329, 2021.

[14] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 16929: Plastics - Determination of the degree of disintegration of plastic materials under defined composting conditions in a pilot-scale test. Geneva, 2021.

[15] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 17088: Plastics – Organic Recycling – Specification for compostable plastics. Geneva, 2021.

[16] European Bioplastics. (2016). Environmental Communications Guide for Bioplastic.

[17] RANDAHWA, Mandeep Kaur et al. Analytical techniques for characterization and quantification of microplastics in the environment: A review. Bulletin of the National Research Centre, v. 47, n. 1, 2023. DOI: 10.1186/s42269-023-01148-0.

[18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 24187: Plastics – Principles for the analysis of microplastics present in environment. Geneva, 2023.