

UFSCar - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CCET - CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DQ - DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Lívia Marques Santos Barreto

**Uso Único - Impacto Permanente: Uma Revisão Bibliográfica sobre
os Desafios da Reciclagem de Plásticos Médicos**

SÃO CARLOS – SP
2026

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Trabalho de Conclusão de Curso

Lívia Marques Santos Barreto

**Uso Único - Impacto Permanente: Uma Revisão Bibliográfica sobre
os Desafios da Reciclagem de Plásticos Médicos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Departamento de Química da Universidade
Federal de São Carlos, como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Química, sob
orientação da Profa. Dra. Roberta Cerasi Urban.

SÃO CARLOS – SP

2026



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA (DQ)**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 19/2026/DQ/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação

FOLHA DE APROVAÇÃO

LÍVIA MARQUES SANTOS BARRETO

**USO ÚNICO - IMPACTO PERMANENTE: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE OS DESAFIOS DA RECICLAGEM
DE PLÁSTICOS MÉDICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 30 de junho de 2026

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Profa Dra. Roberta Cerasi Urban
Membro da Banca 1	Juliana Regina Nunes Flis
Membro da Banca 2	Msc. Gabriel Marcondes Ferraz



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 02/07/2026, às 15:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **2337346** e o código CRC **2DA9C88A**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº
23112.001933/2024-38

SEI nº 2337346

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

DEDICATÓRIA

Dedico este TCC à minha mãe, Marilene, e ao meu pai, Antônio,
que com mãos cansadas e corações firmes
construíram o caminho que me trouxe até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida, por ser minha força diária e por nunca me abandonar e nem desamparar.

À minha mãe, Marilene, e ao meu pai, Antônio, deixo meu mais profundo reconhecimento. Pelo esforço incansável, pelo trabalho árduo de cada dia e noite e, acima de tudo, pelo amor incondicional. Obrigada por acreditarem em mim desde a infância, por me ensinarem o valor da educação, por todos os livros guardados com tanto cuidado para que eu tivesse acesso ao conhecimento e, principalmente, por me ensinarem sobre a vida e transmitirem seus valores. Eu amo intensamente vocês.

Ao meu irmão, Emanuel, pela parceria constante e por compartilhar comigo cada etapa da vida. Mesmo distantes, a saudade sempre se fez presente, e você sempre esteve no meu coração. Obrigada pelas risadas, pelo carinho e pelas conversas. Eu te amo.

Aos meus avós, Maria Josefa e Teresa e em memória a Agenor e Manoel, pelo carinho, pela delicadeza, pelo cuidado, pelo amor e por todas as histórias contadas na calçada.

Às minhas amigas Júlia e Yasmin, pela amizade, pelo apoio e pelo carinho em todos os momentos desta jornada. Compartilhar a graduação com vocês me mostrou como essa etapa da vida poderia ser leve e espontânea.

Aos meus amigos de infância, João e Matheus, pela presença fiel ao longo dos anos e por fazerem parte da minha história. Carrego lembranças bonitas das nossas brincadeiras de infância e me alegra dizer que crescemos juntos. Obrigada por sempre torcerem por mim.

A minha orientadora, Roberta, pelo acompanhamento, orientação e confiança ao longo deste trabalho e pela constante gentileza do início ao fim.

A todos que, de alguma forma, contribuíram genuinamente com gestos ou palavras, que me acolheram, me apoiaram ou me inspiraram, deixo meu sincero agradecimento.

RESUMO

A crescente utilização de plásticos, intensificada especialmente durante a pandemia da COVID-19, resultou no aumento significativo da geração de resíduos hospitalares, evidenciando a necessidade da adoção de práticas sustentáveis para a gestão desses materiais. Nesse contexto, a reciclagem de plásticos de uso médico enfrenta diversos desafios, entre os quais se destacam a diversidade de polímeros utilizados, que dificulta sua reciclagem conjunta devido às diferentes propriedades físico-químicas; os riscos de infecção associados aos resíduos contaminados, que exigem tratamentos prévios rigorosos; a poluição decorrente da incineração, que pode liberar gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos; a geração de microplásticos e nanoplásticos capazes de persistir nos ecossistemas, bem como serem ingeridos e/ou inalados; a presença de aditivos químicos potencialmente tóxicos, que podem migrar para o ambiente durante o descarte ou processamento dos resíduos; e a falta de identificação dos materiais descartados, que dificulta a segregação adequada e compromete a eficiência dos processos de reciclagem. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo analisar criticamente essas barreiras e discutir possíveis soluções, com base em uma revisão da literatura científica. Por fim, foram abordadas práticas sustentáveis de gestão de resíduos, incluindo estratégias de segregação adequada, métodos de reciclagem compatíveis com o contexto hospitalar e industrial e abordagens fundamentadas nos princípios da economia circular, visando à redução dos impactos ambientais e à promoção de uma gestão mais segura e eficiente dos resíduos plásticos médicos.

Palavras-Chave: Resíduos plásticos médicos; Reciclagem; Economia circular; Sustentabilidade; Gestão de resíduos hospitalares.

ABSTRACT

The increasing use of plastics, particularly intensified during the COVID-19 pandemic, has led to a significant rise in the generation of healthcare waste, highlighting the need for sustainable management practices for these materials. In this context, the recycling of medical plastics faces several challenges, including the diversity of polymers used, which hinders joint recycling due to their different physicochemical properties; the risk of infection associated with contaminated waste, which requires rigorous pre-treatment procedures; pollution resulting from incineration, which releases greenhouse gases and contributes to environmental contamination; the generation of microplastics and nanoplastics, which can persist in ecosystems and be ingested and/or inhaled; the presence of potentially toxic chemical additives that may leach into the environment during waste disposal or processing; and the lack of material identification, which hinders proper segregation and compromises the efficiency of recycling processes. Given this scenario, this study aimed to critically analyze these barriers and discuss possible solutions based on a review of the scientific literature. Finally, sustainable waste management practices were addressed, including appropriate segregation strategies, recycling methods compatible with hospital and industrial settings, and approaches based on circular economy principles, aiming to reduce environmental impacts and promote safer and more efficient management of medical plastic waste.

Keywords: Medical plastic waste; Recycling; Circular economy; Sustainability; Healthcare waste management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição polimérica dos produtos plásticos para uso médico	13
Figura 2: Temperatura de fusão de alguns polímeros.....	14
Figura 3: Densidade de alguns polímeros.....	16
Figura 4: Produção global de plástico de 2018 a 2023	17
Figura 5: Resíduos plásticos anuais por método de descarte.....	23
Figura 6: Impactos ambientais (%) dos tratamentos de resíduos plásticos médicos calculados por avaliação do ciclo de vida. HW: resíduos perigosos; GW: resíduos gerais; PR: recuperação de produto. (a) Impacto no aquecimento global; (b) impacto no consumo de água; (c) comparação entre seis categorias de impacto. As barras à esquerda representam o impacto total, enquanto as barras à direita mostram os impactos positivos e negativos de cada processo	25
Figura 7: Lixiviação de aditivos plásticos de microplásticos para a água marinha e sua biodisponibilidade em organismos aquáticos	32
Figura 8: (a) Exposição humana a aditivos plásticos por alimentos; (b) biomonitoramento de metabólitos de ftalatos em períodos pré e pós-natais e (c) correlação positiva. (A) Amostras pré e pós-natais; (B) Amostragem coletada com intervalo de até um ano; e (C) Amostragem coletada com intervalo de até seis meses	33
Figura 9: Simbologia para Identificação de plásticos	35
Figura 10: Simbologia para Identificação de materiais compostos por múltiplos plásticos.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição relativa e tipos de resíduos plásticos produzidos em hospitais e laboratórios hospitalares. (Unidade:%)	15
Tabela 2: Exemplos de doenças causadas por vírus e bactérias patogênicas relacionadas a resíduos biomédicos	20
Tabela 3: Interação entre microplásticos e nanoplásticos e contaminantes químicos no ambiente	28
Tabela 4: Aditivos plásticos e seus impactos.....	31

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

A-PET (G) – PET Amorfo (Polietileno Tereftalato Modificado com Glicol)

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AIDS – Síndrome da Imunodeficiência Adquirida

BDE – Decabromodifenil éter

BPA – Bisfenol A

BTEX – Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno

C-PET – PET Cristalino (Polietileno Tereftalato Cristalino)

C-PVC – PVC Clorado (Policloreto de Vinila Clorado)

Ca – Cálcio

Cl – Cloro

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

COVID-19 – Doença do Coronavírus 2019

Cr – Cromo

DBP – Dibutil ftalato

DEHP – Di(2-etilhexil) ftalato

DEP – Dietil ftalato

DFR – Design para Reciclagem (Design for Recycling)

DnOP – Di-n-octil ftalato

EPIs – Equipamentos de Proteção Individual

EVA – Etileno Acetato de Vinila

Fe – Ferro

HAPs – Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

HCl – Ácido Clorídrico

HDPE – Polietileno de Alta Densidade

HIPS – Poliestireno de Alto Impacto

HIV – Vírus da Imunodeficiência Humana

K – Potássio

LDPE – Polietileno de Baixa Densidade

LLDPE – Polietileno Linear de Baixa Densidade

MBP – Mono-butil ftalato
MBzP – Mono-benzil ftalato
MCPP – Mono-(3-carboxipropil) ftalato
MEHP – Mono-(2-etilhexil) ftalato
MEHHP – Mono-(2-etil-5-hidroxihexil) ftalato
MEOHP – Mono-(2-etil-5-oxohexil) ftalato
MEP – Monoetil ftalato
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MIBP – Mono-isobutil ftalato
MMP – Monometilftalato
MNPs – Microplásticos e Nanoplásticos
MPs – Microplásticos
Mn – Manganês
NBR – Norma Brasileira
NOx – Óxidos de Nitrogênio
NPs – Nanoplásticos
OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMS – Organização Mundial da Saúde
PA – Poliamida
PA6 – Poliamida 6
PA66 – Poliamida 6.6
Pb – Chumbo
PBT – Polibutileno Tereftalato
PBAT – Polibutileno Adipato Tereftalato
PC – Policarbonato
PEEK – Poliéter Éter Cetona
PE – Polietileno
PEI – Polieterimidas
PES – Poliésteres
PET – Polietileno Tereftalato
PGA – Ácido Poliglicólico
PI – Poliimidas
P-PVC – PVC Plastificado
PPS – Sulfeto de Polifenileno

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

PSU – Polissulfonas

PTFE – Politetrafluoretileno

PU – Poliuretanos

PVC – Policloreto de Vinila

RIC – Resin Identification Code (Código de Identificação de Resinas)

SBF – Simulated Body Fluid (Fluido Corporal Simulado)

Si – Silício

SO_x – Óxidos de Enxofre

Ti – Titânio

U-PVC – PVC Não Plastificado (PVC Rígido)

V – Vanádio

Zr – Zircônio

µm – Micrômetro

SUMÁRIO

1. OBJETIVOS.....	11
2. INTRODUÇÃO	11
3. DESAFIOS DA RECICLAGEM DE PLÁSTICOS MÉDICOS	12
3.1 DIVERSIDADE POLIMÉRICA.....	12
3.2 CONTAMINAÇÃO BIOLÓGICA.....	17
3.3 CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL	21
3.4 CONTAMINAÇÃO POR MICROPLÁSTICOS E NANO PLÁSTICOS.....	26
3.5 CONTAMINAÇÃO POR ADITIVOS QUÍMICOS.....	29
3.6 LIMITAÇÕES NO DESIGN.....	34
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
5. REFERÊNCIAS.....	38

1. OBJETIVOS

Este trabalho visa analisar e apresentar os principais desafios na reciclagem de plásticos médicos, por meio de uma revisão bibliográfica. Além disso, busca discutir soluções viáveis e sustentáveis para o descarte, a reciclagem e a mitigação de resíduos gerados, que possam ser aplicadas com segurança em ambientes hospitalares e industriais.

2. INTRODUÇÃO

A pandemia de COVID-19 (doença do coronavírus 2019) realçou a importância e a dependência da sociedade em relação à utilização de plásticos médicos (PARASHAR; HAIT, 2021). A escolha desses materiais para o setor da saúde deve-se às suas propriedades vantajosas, como versatilidade, flexibilidade, baixo custo e a possibilidade de descarte, que permitiram a substituição de materiais como vidro, cerâmica e aço, os quais apresentam maiores dificuldades em processos como a esterilização (JOSEPH *et al.*, 2021).

Contudo, apesar da relevância do plástico, seu uso intensivo e a gestão inadequada de resíduos, desde a utilização até o descarte, geram sérios problemas ambientais e de saúde pública (JOSEPH *et al.*, 2021; CHO *et al.*, 2024; ALRAZEN *et al.*, 2025). O caráter de uso descartável de muitos produtos contribui para o acúmulo de resíduos no meio ambiente, uma vez que a maioria dos polímeros médicos possui alta estabilidade química e baixa biodegradabilidade. Essa característica, embora benéfica para o uso médico, torna-se uma desvantagem no descarte, resultando em tempos de degradação que podem durar centenas de anos em ambientes naturais (HAHLADAKIS *et al.*, 2018; ALRAZEN *et al.*, 2025).

Atualmente, a maior parte dos resíduos plásticos é encaminhada para aterros sanitários. Essa prática é questionável, pois, apesar de ser um caminho fácil e rápido, representa a perda do potencial de reciclagem e, conseqüentemente, de reinserção desses materiais na cadeia produtiva, além de contribuir para a contaminação ambiental e para a emissão de gases de efeito estufa (HAHLADAKIS *et al.*, 2018).

Para superar o descarte convencional, diversas abordagens de recuperação de recursos têm sido investigadas, incluindo a reciclagem mecânica, a reciclagem química e a recuperação energética, cujos mecanismos variam conforme o tipo de

polímero (HAHLADAKIS *et al.*, 2018). No entanto, a reciclagem de plásticos médicos apresenta desafios adicionais, além da diversidade de polímeros utilizados, a contaminação biológica pós-consumo e a presença de aditivos químicos e um design de produtos que não prioriza a circularidade, que tornam o processo ainda mais complexo (HAHLADAKIS *et al.*, 2018; JOSEPH *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, esta revisão bibliográfica explora os desafios da reciclagem de plásticos médicos, destacando uma contradição fundamental: a praticidade e a redução de riscos de contaminação imediata impulsionam a ampla adoção de materiais de uso único. Contudo, essa concepção restringe a circularidade, dificultando a recuperação, reutilização e reinserção produtiva, ou seja, uma questão além da gestão de resíduos.

3. DESAFIOS DA RECICLAGEM DE PLÁSTICOS MÉDICOS

3.1 DIVERSIDADE POLIMÉRICA

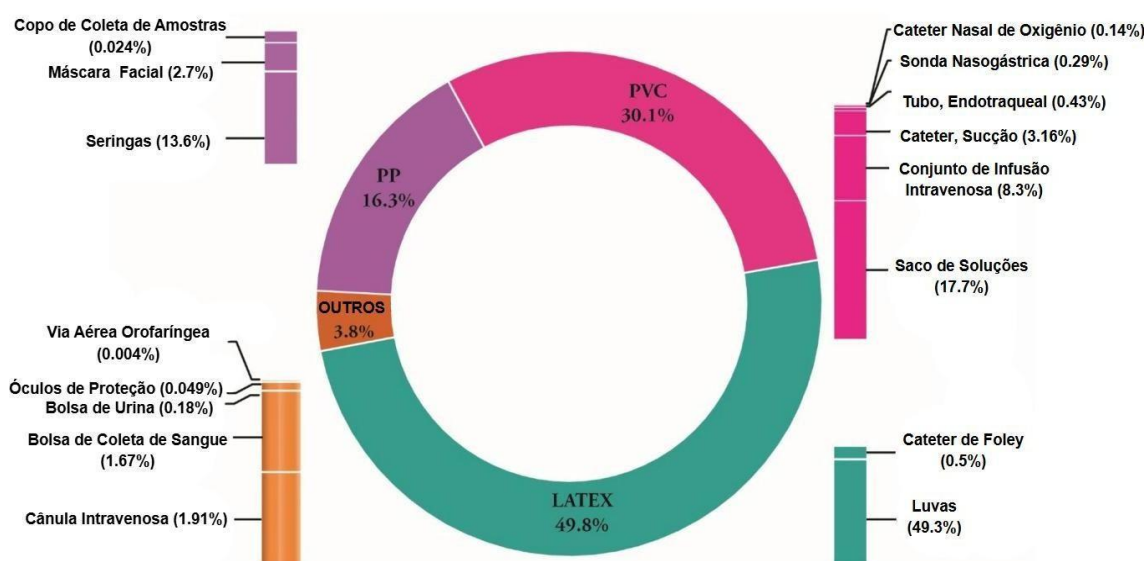
A diversidade de materiais poliméricos possibilitou o desenvolvimento de dispositivos médicos com características específicas, acarretando crescente uso de plásticos na área da saúde, selecionados por suas propriedades específicas essenciais para o produto. Essas propriedades incluem flexibilidade, transparência, resistência mecânica, estabilidade térmica, capacidade de barreira a gases, compatibilidade com processos de esterilização e viabilidade de modificações superficiais, como revestimentos antimicrobianos, cruciais para reduzir riscos de contaminação e infecção hospitalar (JOSEPH *et al.*, 2021).

Entre os polímeros mais comumente utilizados em aplicações médicas estão o polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS) e o cloreto de polivinila (PVC). Esses materiais são amplamente encontrados em tubulações, filmes e embalagens, conectores, utensílios de laboratório, bolsas de soro, catéteres, máscaras faciais, componentes para administração de medicamentos, *luers*, membranas e suturas (JOSEPH *et al.*, 2021). Outros termoplásticos relevantes incluem poliamidas (PA), poliésteres (PES), policarbonatos (PC), poliuretanos (PU), acrílicos e acetais, utilizados em instrumentos cirúrgicos, componentes de conjuntos sanguíneos, oxigenadores, seringas, catéteres e peças móveis (JOSEPH *et al.*, 2021). Polímeros como poliimidas (PI), polieterimidas (PEI), polissulfonas (PSU), poliéter éter cetona

(PEEK), sulfeto de polifenileno (PPS), fluoropolímeros, polímeros de cristal líquido, biopolímeros, além de termofixos e adesivos, são empregados em instrumentos e bandejas cirúrgicas, seringas, implantes (dentários e ósseos), suturas biorreabsorvíveis, peças de alta precisão e componentes eletrônicos (JOSEPH *et al.*, 2021).

A Figura 1 ilustra a diversidade de polímeros presentes nos produtos médicos, mostrando a distribuição relativa dos principais materiais utilizados. O látex constitui a maior fração, seguido pelo PVC e PP, amplamente empregados em dispositivos como bolsas, equipos de infusão, seringas e outros componentes médicos. O gráfico também indica a presença de polímeros, como PE, PET, politetrafluoretileno (PTFE), PC e etileno acetato de vinila (EVA), em menores proporções (SIRAJ *et al.*, 2025).

Figura 1: Composição polimérica dos produtos plásticos para uso médico

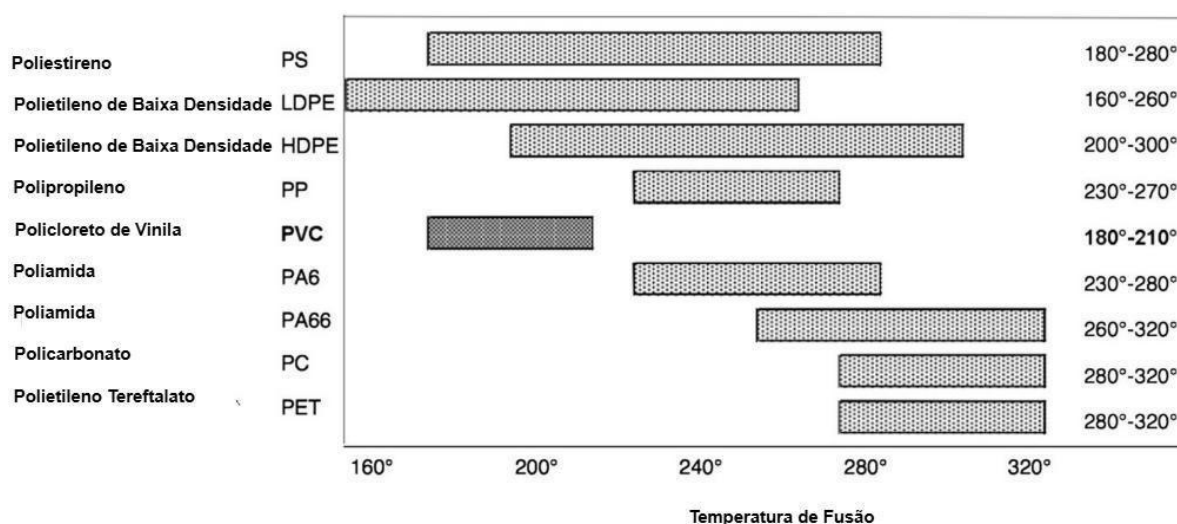


Fonte: Adaptado de Siraj *et al.*, (2025)

No entanto, essa mesma diversidade química e estrutural, que confere alta versatilidade aos produtos médicos, impacta diretamente as rotas de reciclagem. Isso representa um desafio único para o setor da saúde, distinto dos resíduos plásticos urbanos, devido às exigências funcionais, sanitárias e regulatórias. Polímeros diferentes frequentemente possuem propriedades térmicas e mecânicas incompatíveis, o que dificulta o reprocessamento conjunto e exige etapas rigorosas de separação, compatibilização ou a adoção de tecnologias de reciclagem alternativas (ACHILIAS, 2025). Esse cenário é agravado pelas diferenças nos pontos de fusão e condições de processamento dos polímeros, onde o reprocessamento simultâneo

pode levar à degradação térmica ou termomecânica de parte dos componentes da mistura (TITONE; GULINO; LA MANTIA, 2023). A Figura 2 apresenta a variação dos pontos de fusão entre os diferentes polímeros. Considerando que o processamento industrial geralmente ocorre na temperatura exigida pelo polímero de maior estabilidade térmica, materiais com menor resistência podem ser expostos a condições que promovem sua degradação (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

Figura 2: Temperatura de fusão de alguns polímeros



Fonte: Adaptado de RAGAERT; DELVA; VAN GEEM (2017)

Outra consequência da diversidade polimérica na reciclagem é a incompatibilidade entre diferentes tipos de plásticos. Um exemplo comum na literatura é a contaminação do PET por PVC. Pequenas frações de PVC, quando submetidas a altas temperaturas para reprocessamento do PET, sofrem degradação térmica, liberando ácido clorídrico. Esse processo acelera a degradação da matriz de PET, resultando em perda de propriedades mecânicas e alterações indesejáveis de cor. Da mesma forma, a mistura de PE com PP pode gerar materiais frágeis devido à baixa compatibilidade entre as fases poliméricas (DORIGATO, 2021).

Além da variedade de polímeros nos diferentes produtos médicos, a coexistência de múltiplos polímeros em um único item também é um desafio. Esse aspecto está diretamente ligado às decisões de projeto, evidenciando a importância dos conceitos de *Design para Reciclagem* (*Design for Recycling* - DfR). Nesses conceitos, a escolha de materiais, a redução do número de polímeros e a possibilidade de desmontagem são consideradas desde a fase de concepção do produto, o que aumenta significativamente a complexidade do gerenciamento desses

resíduos (WU; GAO; LI, 2025).

A abordagem de matrizes poliméricas multicomponentes busca combinar propriedades específicas para aplicações mais eficientes em comparação com polímeros tradicionais isolados (DORIGATO, 2021). Nesse contexto, um estudo de Lee, Ellenbecker e Moure-Eraso (2002) compilou dados sobre a composição polimérica de alguns produtos e os tipos de resíduos plásticos gerados em hospitais e laboratórios hospitalares, destacando a heterogeneidade (Tabela 1). Os dados revelam uma grande variedade de polímeros em um único item, como bolsas de soro, que podem conter PVC, HDPE, PP e acrilonitrila butadieno estireno (ABS), e embalagens médicas, frequentemente contendo PVC, PE e PS. Essa multiplicidade de materiais ressalta a complexidade e heterogeneidade dos resíduos plásticos na área médica, intensificando os desafios de gerenciamento (LEE; ELLENBECKER; MOURE-ERASO, 2002). A presença de diferentes polímeros em um mesmo dispositivo dificulta a identificação e segregação corretas, tornando as técnicas tradicionais de reciclagem para plásticos convencionais insuficientes (LEE; ELLENBECKER; MOURE-ERASO, 2002).

Tabela 1: Composição relativa e tipos de resíduos plásticos produzidos em hospitais e laboratórios hospitalares. (Unidade:%)

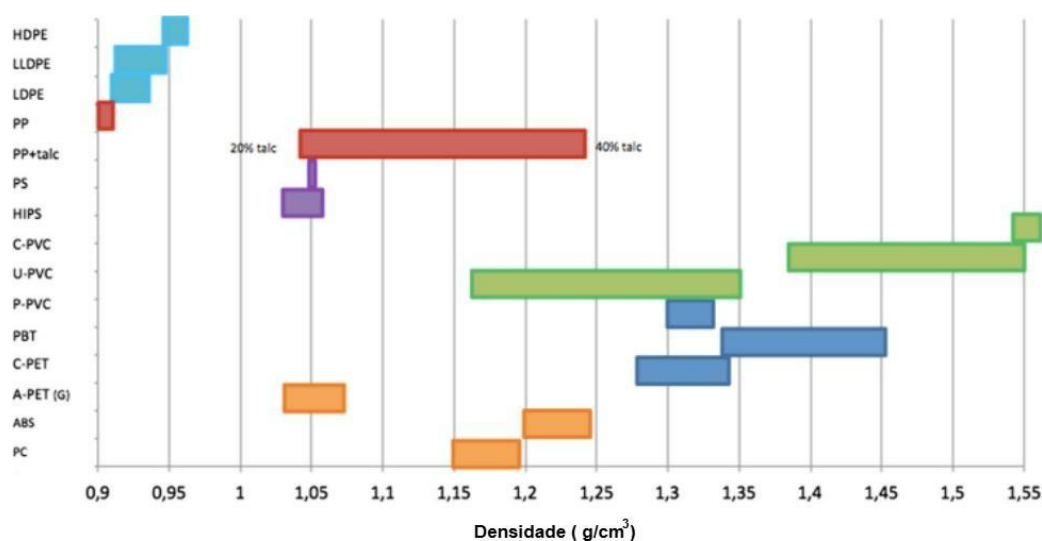
	Bolsa de soro	Bolsa de sangue	Perfuro-cortantes	Tubulação	Luvas/ Equipamentos de laboratório	Médico/ Embalagem	Kits para pacientes	Artigos para berçário	Outros plásticos
Hospital	9-11	3-10	5-25	3-10	5-20	20-30	5-10	5	5-19
Laboratórios hospitalares	1	2	4	3	20	0	0	0	70 (Tubos para coleta de sangue)
Tipos de plásticos	PVC HDPE PP ABS	PVC	PP PE	PVC HDPE	PVC PP PS	PVC PE PS	PVC	PP PE	PVC PS

Fonte: Adaptado de LEE; ELLENBECKER; MOURE-ERASO (2002)

Outro fator crítico é a sobreposição de densidades entre os polímeros, o que limita a eficiência das rotas de separação física (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017). A flotação, por exemplo, é uma técnica de separação baseada na densidade e apresenta limitações importantes, pois não permite uma separação eficiente e completa dos diferentes polímeros em fluxos homogêneos. Consequentemente, rotas de reciclagem que dependem unicamente desse critério tornam-se inviáveis, reforçando a complexidade inerente ao gerenciamento e à reciclagem de plásticos mistos (RAGAERT; DELVA; VAN GEEM, 2017).

A Figura 3 ilustra a densidade de alguns polímeros. Caso esses polímeros sejam reciclados conjuntamente, a heterogeneidade estrutural e térmica favorece a formação de sistemas poliméricos incompatíveis, resultando em materiais frágeis com propriedades mecânicas inferiores e limitações quanto às aplicações finais (TITONE; GULINO; LA MANTIA, 2023).

Figura 3: Densidade de alguns polímeros



Fonte: Adaptado de RAGAERT; DELVA; VAN GEEM (2017)

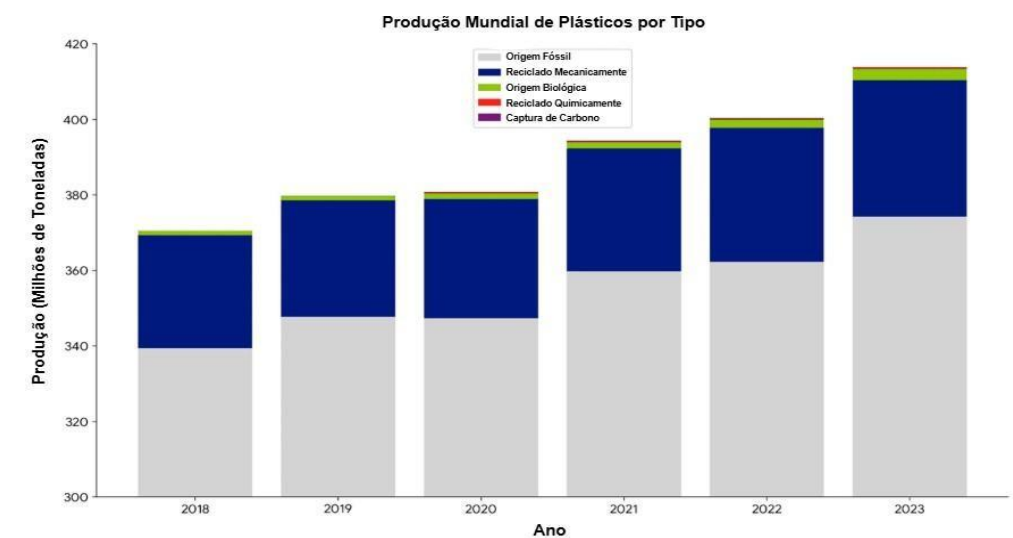
Diante desse cenário, fica claro que as rotas convencionais de reciclagem não são suficientes para lidar com a complexidade dos resíduos plásticos médicos. Isso reforça a necessidade de estratégias alternativas de gerenciamento e o desenvolvimento de tecnologias mais adequadas para esse tipo específico de resíduos.

3.2 CONTAMINAÇÃO BIOLÓGICA

A contaminação biológica representa um desafio específico para a reciclagem de plásticos médicos, pois resíduos provenientes de ambientes hospitalares podem conter sangue, fluidos corporais, microrganismos e outros agentes potencialmente infecciosos. Isto porque o aumento contínuo da produção e do uso de materiais descartáveis na saúde sobrecarrega os sistemas de segregação, tratamento e descontaminação desses resíduos, especialmente dada a capacidade limitada de reaproveitamento (ALRAZEN *et al.*, 2025).

A Figura 4 mostra a produção global de plásticos de 2018 a 2023, indicando um aumento de aproximadamente 10,4% no volume total. Plásticos de origem fóssil permanecem predominantes: 91,6% em 2018 e 90,4% em 2023. Já os plásticos reciclados mecanicamente tiveram um crescimento modesto: de 8,1% para 8,75%, enquanto os de base biológica e reciclados quimicamente mantêm participação pequena: 0,32% para 0,73% e 0,03% para 0,07%, respectivamente. Plásticos produzidos por captura de carbono também têm valores mínimos: de 0,03% para 0,05% (ALRAZEN *et al.*, 2025).

Figura 4: Produção global de plástico de 2018 a 2023



Fonte: Adaptado de ALRAZEN *et al.*, (2025)

Esses dados mostram que, apesar dos avanços na reciclagem, a contribuição dessas alternativas ainda é limitada em comparação com o volume total de plásticos, sendo que a demanda global por esses materiais continua superando a capacidade

de reaproveitamento, intensificando os desafios de gestão de resíduos plásticos (ALRAZEN *et al.*, 2025).

No contexto dos plásticos médicos, a problemática biológica é ainda mais crítica. Equipamentos de Proteção Individual (EPIs), como máscaras, podem contribuir para a contaminação ambiental devido aos resíduos liberados no meio ambiente, especialmente quando descartados inadequadamente. Esses materiais, ao se degradarem, podem se dispersar em diferentes ambientes e gerar impactos sobre organismos vivos presentes nesses ecossistemas. Esses impactos podem ocorrer pela interação dos organismos com resíduos plásticos inteiros ou fragmentados, bem como pela exposição a partículas menores geradas durante sua degradação, como microplásticos e nanoplásticos (FERRAZ *et al.*, 2025).

A pandemia de COVID-19 aumentou drasticamente a geração de resíduos médicos globais (NEMATOLLAHI; TUYSSERKANI; NEMATOLLAHI, 2025). Estima-se um aumento médio de 3,4 kg de resíduos de serviços de saúde por leito hospitalar por dia durante a pandemia, com picos de até 425% em países em desenvolvimento (NEMATOLLAHI; TUYSSERKANI; NEMATOLLAHI, 2025). Esse aumento foi impulsionado pelo uso massivo de equipamentos de proteção individual descartáveis, materiais de testagem e insumos de uso único, sobrecarregando os sistemas de gerenciamento, tratamento e descarte de resíduos potencialmente infecciosos (NEMATOLLAHI; TUYSSERKANI; NEMATOLLAHI, 2025). Este uso intensificado revelou uma dependência a estes materiais e limitações estruturais na gestão de resíduos, dado que grande parte do descarte foi mal gerenciado.

Após os resíduos radioativos, os resíduos de serviços de saúde são considerados os mais perigosos globalmente devido a sua alta carga infecciosa e potencial de disseminação de doenças se não forem manejados corretamente (DAS *et al.*, 2021). Esses resíduos são gerados principalmente em hospitais, unidades de atenção primária, laboratórios, necrotérios, centros de autópsia, bancos de sangue e instituições de longa permanência, estando associados a atividades de diagnóstico, tratamento, imunização, pesquisa e produção de insumos biológicos (DAS *et al.*, 2021).

Um dos maiores desafios em centros de saúde é a contaminação de materiais por sangue e outros fluidos corporais, o que pode aumentar o risco de infecções se os resíduos não forem desinfetados adequadamente (JOSEPH *et al.*, 2021). A má gestão de resíduos plásticos médicos representa um risco direto à saúde pública, pois

a diversidade de resíduos gerados em ambientes clínicos e laboratoriais pode transportar vírus, bactérias, agentes químicos e materiais físicos com potencial tóxico e infeccioso (JOSEPH *et al.*, 2021; SAHOO *et al.*, 2023).

A falta de segregação adequada entre resíduos contaminados e não contaminados agrava ainda mais o cenário. Resíduos infecciosos (materiais contaminados com sangue, fluidos corporais, excreções humanas, culturas laboratoriais e produtos microbiológicos) são uma das principais vias de exposição ocupacional. Profissionais de saúde e trabalhadores da coleta são particularmente vulneráveis, pois esses resíduos podem conter patógenos que causam doenças (DAS *et al.*, 2021). Falhas na manipulação, separação, armazenamento, transporte, processamento e descarte contribuem significativamente para o aumento do risco de infecções ocupacionais (DAS *et al.*, 2021).

Entre os resíduos hospitalares, os resíduos patológicos merecem atenção especial. Constituídos por tecidos, órgãos ou fragmentos corporais humanos ou animais provenientes de procedimentos cirúrgicos, necropsias e análises laboratoriais, esses resíduos apresentam risco adicional devido à possibilidade de conter partículas virais viáveis. Dessa forma, exigem manuseio rigoroso e estratégias específicas de acondicionamento e tratamento para evitar a disseminação de infecções (DAS *et al.*, 2021; PÉPIN *et al.*, 2014). Dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) indicam que práticas inadequadas de gestão desses resíduos, em 2010, foram associadas a aproximadamente 33.800 infecções por HIV, 1,7 milhão de casos de hepatite B e 315.000 casos de hepatite C, evidenciando o impacto da falta de biossegurança no descarte de materiais médicos (PÉPIN *et al.*, 2014).

Além dos riscos diretos à saúde humana, a contaminação biológica em plásticos médicos tem efeitos ambientais relevantes. Superfícies plásticas podem servir como substrato para a colonização e desenvolvimento de microrganismos patogênicos, especialmente com a presença de resíduos perfurocortantes (agulhas, lâminas e vidros quebrados), que atuam como vetores eficientes de transmissão de patógenos. A capacidade de sobrevivência de vírus em superfícies plásticas intensifica esses riscos, principalmente em pandemias, onde a exposição ocupacional pode contribuir para a transmissão comunitária (DAS *et al.*, 2021).

Estudos mostram que esses microrganismos são frequentemente encontrados em ambientes aquáticos e em áreas de intensa atividade humana, onde a maior disponibilidade de nutrientes favorece a formação de biofilmes em plástico (MENG, *et al.*, 2021). Nesse contexto, resíduos plásticos contaminados podem atuar como vetores, facilitando a dispersão de patógenos no ambiente e ao longo da cadeia trófica. Esse processo representa riscos à saúde humana, animal e ecológica, agravados pela mobilidade dos microplásticos e nanoplásticos (MNPs), que ampliam o alcance desses contaminantes (MENG, *et al.*, 2021).

A Tabela 2 ilustra esse risco biológico, apresentando exemplos de doenças causadas por vírus e bactérias patogênicas associadas a resíduos biomédicos, e evidenciando o impacto sanitário da exposição a esses materiais. Soma-se a isso a geração de resíduos farmacêuticos, como medicamentos vencidos, contaminados ou inutilizados, incluindo vacinas e outros produtos biológicos. O aumento do consumo de fármacos em hospitais, especialmente em emergências sanitárias, eleva o volume desses resíduos e intensifica os riscos à saúde dos trabalhadores e ao meio ambiente, caso as práticas de segregação, coleta e tratamento não sejam adequadas (DAS *et al.*, 2021; SAHOO *et al.*, 2023).

Tabela 2: Exemplos de doenças causadas por vírus e bactérias patogênicas relacionadas a resíduos biomédicos

Vírus	Doença	Bactéria	Doença
Adenovírus	Resfriados	<i>Pseudomonas cepacia</i>	Doenças não respiratórias transmitidas pelo ar
Arenavírus (Junin)	Febre hemorrágica	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
Arenavírus (Lassa)	Febre de Lassa	<i>Bacillus anthracis</i>	Antraz
Coronavírus	Resfriados	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
Vírus Ebola	Febre	<i>Mycoplasma pneumoniae</i>	Pneumonia
Echovírus	Resfriados	<i>Salmonella Typhi</i>	Febre tifóide
Filovírus (Marburg)	Febre hemorrágica	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Tuberculose
Hepatite C	Infecção hepática		
Varicela-zoster	Catapora		
Rotavírus	Diarreia infantil		
Vírus da imunodeficiência humana (HIV)	Síndrome da imunodeficiência adquirida (AIDS)		
Parainfluenza	Gripe		

Fonte: Adaptado de SAHOO *et al.*, (2023)

Portanto, a contaminação biológica em plásticos médicos aponta falhas no gerenciamento desses resíduos, que não apenas comprometem a biossegurança, mas também aumentam os impactos ambientais relacionados ao descarte e tratamento desses materiais. Isso afeta simultaneamente a biossegurança e a sustentabilidade ambiental, reforçando a necessidade de melhorar as estratégias de manejo e tratamento.

3.3 CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL

Um dos desafios centrais nos centros de saúde é a ausência ou ineficiência de segregação entre resíduos perigosos e não perigosos (CHO *et al.*, 2024). Essa limitação leva à mistura de resíduos comuns (garrafas plásticas de água, papel, revistas, jornais, restos de alimentos e embalagens) com resíduos perigosos de atividades assistenciais, incluindo materiais potencialmente contaminados por agentes infecciosos, resíduos patológicos, perfurocortantes e farmacêuticos (CHO *et al.*, 2024; DAS *et al.*, 2021). Consequentemente, resíduos originalmente sem risco biológico passam a ser tratados como perigosos, alterando sua classificação e comprometendo as estratégias de gerenciamento subsequentes.

Esse manejo conjunto compromete as etapas de tratamento e destinação final, pois reduz as possibilidades de reciclagem e frequentemente direciona esses materiais para incineração ou descarte inadequado, ampliando os impactos ambientais, sanitários e operacionais (CHO *et al.*, 2024). Materiais que poderiam ser recuperados e reinseridos na cadeia produtiva deixam de ser valorizados e integram fluxos de resíduos perigosos, aumentando o volume de resíduos para tratamentos mais restritivos e ambientalmente impactantes. Esse cenário é agravado pela significativa parcela de resíduos médicos que podem apresentar características infecciosas, tóxicas e/ou corrosivas, podendo, quando mal manejados, atuar como fonte de contaminação ambiental e contribuir para a degradação da qualidade do ar, da água e do solo (BOLAN *et al.*, 2023).

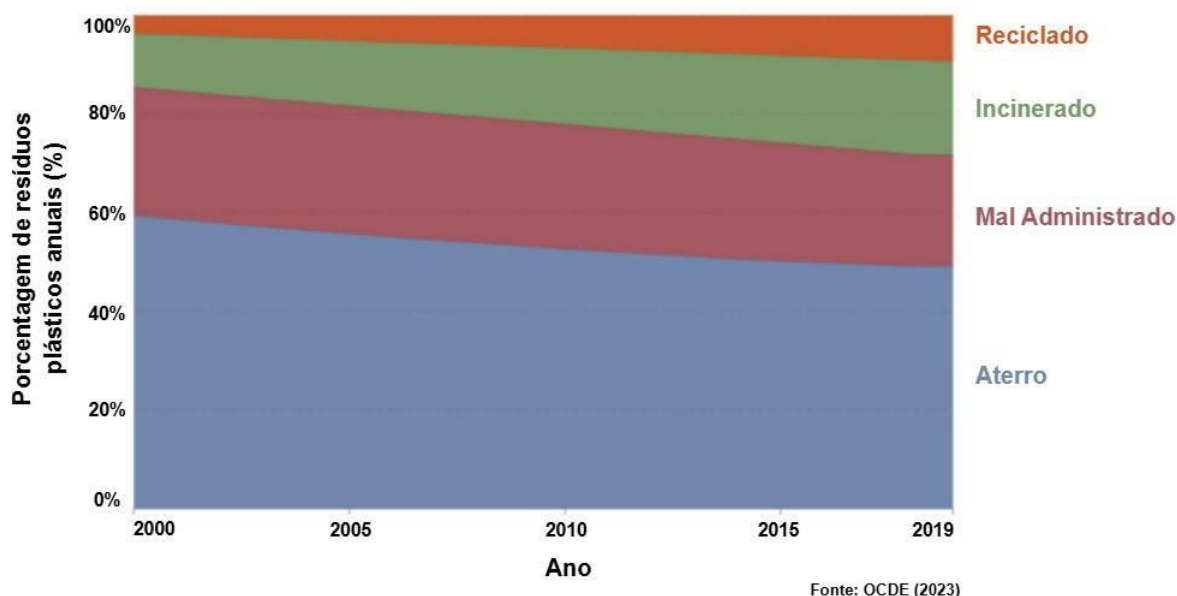
Além disso, a gestão de resíduos no setor da saúde contribui significativamente para as emissões globais de gases de efeito estufa, sendo responsável por aproximadamente 4,4% das emissões líquidas globais. Isso demonstra que as práticas atuais não apenas impactam os sistemas ambientais locais, mas também

contribuem para alterações ambientais em escala global, reforçando a necessidade de estratégias mais eficientes e sustentáveis de gerenciamento (BOLAN et al., 2023).

Por outro lado, a segregação adequada permitiria a separação eficiente entre resíduos contaminados e não contaminados, possibilitando que os materiais não infectados fossem encaminhados com segurança para processos de reciclagem. Isso reduziria o volume destinado a aterros sanitários, diminuiria a demanda por matérias-primas virgens e mitigaria os impactos ambientais associados ao manejo inadequado dos resíduos de serviços de saúde (CHO et al., 2024).

Essa limitação no manejo local reflete um problema global na gestão de resíduos plásticos. A Figura 5 mostra que, apesar do aumento gradual das taxas de reciclagem e incineração, essas estratégias ainda representaram menos de 30% do destino dos resíduos plásticos em 2019 (ALRAZEN et al., 2025). Esse dado revela que os avanços tecnológicos e normativos recentes não foram suficientes para mudar substancialmente o modelo global de gestão, mantendo a predominância de métodos de disposição final que não promovem a recuperação de recursos.

Nesse contexto, o aterro sanitário continua sendo o principal método de descarte de resíduos plásticos, evidenciando uma dependência estrutural desse sistema e a dificuldade persistente na implementação de práticas de economia circular em larga escala. Consequentemente, há uma subutilização dos resíduos plásticos como recurso e uma manutenção da dependência da extração de matérias-primas fósseis para a produção de novos materiais, intensificando os impactos ambientais do modelo linear de produção e descarte (ALRAZEN et al., 2025).

Figura 5: Resíduos plásticos anuais por método de descarte

Fonte: Adaptado de ALRAZEN *et al.*, (2025)

Embora os aterros sanitários sejam o destino mais comum para resíduos plásticos, os resíduos médicos apresentam riscos sanitários adicionais devido à possível presença de agentes infecciosos e contaminantes biológicos. Por essas características, a incineração é frequentemente usada como alternativa viável, pois reduz significativamente o volume dos resíduos e destrói patógenos e materiais orgânicos perigosos (JOSEPH *et al.*, 2021; NEMATOLLAHI; TUYSSERKANI; NEMATOLLAHI, 2025).

Contudo, a incineração pode liberar material particulado, dióxido de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido e dióxido de carbono (CO e CO₂), cloreto de hidrogênio (HCl), dioxinas e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), que contribuem para a degradação da qualidade do ar e podem causar efeitos adversos ao meio ambiente e à saúde humana, como problemas respiratórios (JOSEPH *et al.*, 2021; EPHRAIM; ITA; EUSEBIUS, 2013). Além disso, a incineração de polímeros contendo cloro, como o PVC, favorece a formação de dioxinas e furanos (compostos carcinogênicos) e libera compostos colorados como cloreto de hidrogênio, contribuindo para a formação de compostos ácidos e chuva ácida (JOSEPH *et al.*, 2021; BOLAN *et al.*, 2023). Assim, a incineração, embora reduza o risco biológico imediato, contribui para impactos ambientais e riscos toxicológicos relevantes.

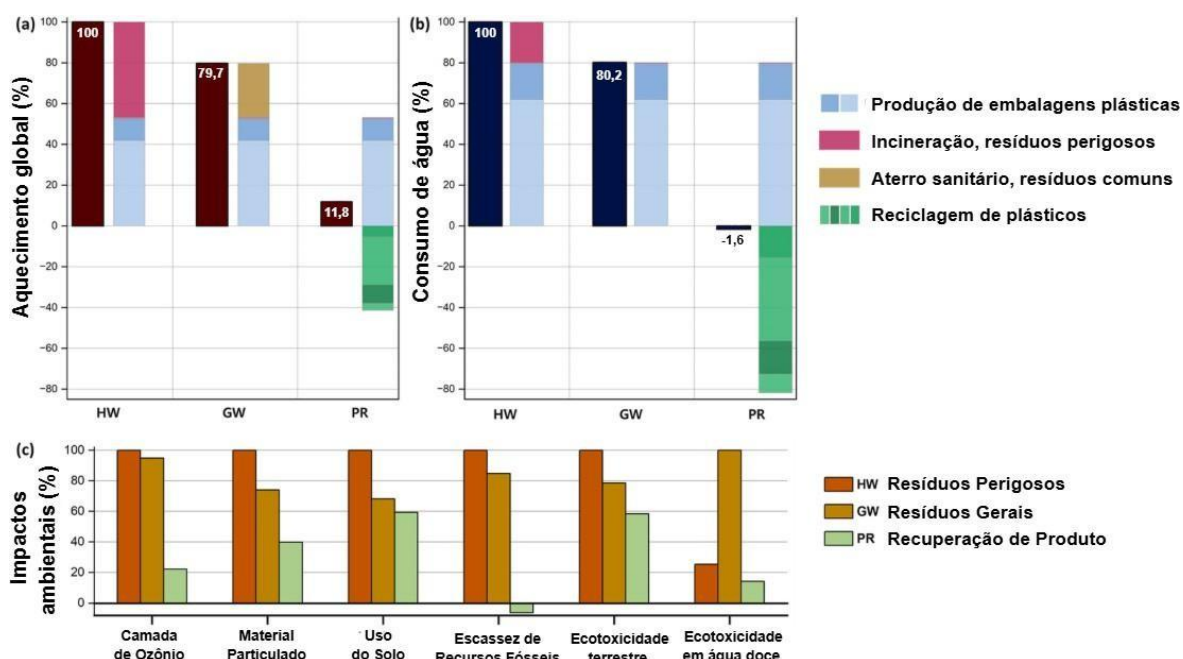
Outro aspecto relevante do descarte e tratamento inadequado de resíduos hospitalares é a contaminação ambiental por substâncias tóxicas no solo, água e ar. O descarte de resíduos médicos não tratados em aterros sanitários, especialmente sem impermeabilização e controle adequados, pode permitir a infiltração de contaminantes e comprometer a qualidade das águas subterrâneas e superficiais, incluindo fontes de abastecimento humano (BOLAN *et al.*, 2023).

Além disso, a formação de lixiviados com compostos orgânicos e tóxicos, bem como a emissão de gases contendo compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos aromáticos, dentre eles benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX), representam uma importante via de exposição ambiental e humana, com potencial para causar efeitos adversos à saúde e comprometer o equilíbrio dos ecossistemas (BOLAN *et al.*, 2023).

Esses processos também podem contaminar e afetar diretamente a qualidade do solo, comprometendo sua capacidade produtiva e favorecendo a transferência de contaminantes para sistemas agrícolas. Um estudo de Ephraim; Ita; Eusebius (2013) sobre a queima de resíduos hospitalares identificou concentrações elevadas de silício (Si), cloro (Cl), potássio (K), cálcio (Ca), titânio (Ti), vanádio (V), cromo (Cr), manganês (Mn), ferro (Fe), zircônio (Zr) e chumbo (Pb) no solo, acima dos limites agrícolas. Esses resultados indicam que o descarte e tratamento inadequado de resíduos hospitalares podem acumular contaminantes no solo, aumentando o risco de transferência para plantações e águas subterrâneas, representando uma via de exposição indireta para ecossistemas e para a saúde humana (EPHRAIM; ITA; EUSEBIUS, 2013; BOLAN *et al.*, 2023).

Diante desses impactos, diversas estratégias de tratamento têm sido avaliadas para reduzir os efeitos ambientais do manejo de resíduos plásticos médicos. Cho *et al.* (2024) simularam três cenários ideais de tratamento por meio de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV): (i) incineração de resíduos perigosos; (ii) segregação de resíduos, com descarte de materiais não contaminados em aterros e incineração convencional; e (iii) reciclagem mecânica de resíduos segregados (Figura 6). Essa metodologia permitiu comparar os impactos ambientais associados a diferentes cenários de tratamento e destinação dos resíduos (CHO *et al.*, 2024).

Figura 6: Impactos ambientais (%) dos tratamentos de resíduos plásticos médicos calculados por avaliação do ciclo de vida. HW: resíduos perigosos; GW: resíduos gerais; PR: recuperação de produto. (a) Impacto no aquecimento global; (b) impacto no consumo de água; (c) comparação entre seis categorias de impacto. As barras à esquerda representam o impacto total, enquanto as barras à direita mostram os impactos positivos e negativos de cada processo.



Fonte: Adaptado de CHO *et al.*, 2024

Os resultados, baseados na média dos impactos ambientais em saúde humana, ecossistemas terrestres e sistemas de água doce, indicaram que a incineração de resíduos perigosos teve o pior desempenho ambiental. Esse cenário foi associado aos altos impactos no aquecimento global, consumo de água, degradação da qualidade do ar e toxicidade ambiental, principalmente pela queima de polímeros e impossibilidade de recuperação dos materiais (CHO *et al.*, 2024).

O tratamento de resíduos gerais, com descarte em aterros sanitários, mostrou uma redução parcial dos impactos em comparação com a incineração, mas manteve efeitos ambientais relevantes, especialmente nos ecossistemas aquáticos, devido à geração de lixiviados e à falta de valorização dos materiais (CHO *et al.*, 2024). Em contraste, a reciclagem mecânica com segregação adequada apresentou o melhor desempenho ambiental, com reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa, consumo de recursos naturais e demanda por matérias-primas virgens (CHO *et al.*, 2024).

Esses resultados indicam que o aterro sanitário, embora menos impactante que a incineração, não resolve o problema ambiental dos resíduos plásticos médicos, pois mantém fontes de contaminação e impede a recuperação de materiais. Isso mostra que a falta de segregação adequada favorece o descarte em aterros, perpetuando a contaminação ambiental, a emissão de poluentes e a perda de recursos.

3.4 CONTAMINAÇÃO POR MICROPLÁSTICOS E NANOPLÁSTICOS

Os resíduos plásticos de fontes domésticas e hospitalares, conforme discutido anteriormente, acumulam-se no ambiente e podem fragmentar-se continuamente em microplásticos (MPs) e nanoplásticos (NPs) (KHANNA *et al.*, 2024; AMOBONYE *et al.*, 2021; MOHANA *et al.*, 2023). Isto ocorre devido à elevada resistência dos materiais plásticos à degradação completa, processo que depende de fatores físicos, químicos e biológicos, que acarreta transformação contínua dos materiais poliméricos no ambiente (MOHANA *et al.*, 2023; RAY *et al.*, 2022). Esta degradação gradual favorece a geração dos MNPs e amplia sua dispersão ambiental, especialmente em um contexto de má gestão de resíduos (RAY *et al.*, 2022).

Essas partículas são reconhecidas como contaminantes emergentes devido à sua persistência no ambiente, ampla distribuição e capacidade de interagir com organismos vivos e outros contaminantes, principalmente em ecossistemas aquáticos, por meio de lixiviados e escoamento urbano (KHANNA *et al.*, 2024; AMOBONYE *et al.*, 2021; MOHANA *et al.*, 2023).

Uma vez dispersos no ambiente, os MNPs distribuem-se entre os ambientes aquáticos, terrestres e atmosféricos, aumentando a exposição de organismos e seres humanos por diferentes vias, que envolvem a ingestão de alimentos contaminados, o contato direto e a inalação (GOSWAMI *et al.*, 2024; YEE *et al.*, 2021). Em sistemas aquáticos, sua disponibilidade facilita a ingestão pelos organismos aquáticos, o que favorece processos de bioacumulação e transferência ao longo da cadeia alimentar, atingindo diferentes níveis tróficos (MOHANA *et al.*, 2023).

A presença contínua de MNPs compromete a qualidade ambiental, interferindo em processos ecológicos essenciais e ampliando a exposição (MOHANA *et al.*, 2023). Essa incorporação está associada a efeitos físicos e fisiológicos adversos, como

obstrução, alterações do balanço energético, do metabolismo, da resposta imune e da reprodução, embora nem sempre causem mortalidade imediata (FERRAZ *et al.*, 2025; MOHANA *et al.*, 2023). Estudos com invertebrados e organismos aquáticos demonstraram redução de vitalidade e fertilidade, além de alterações metabólicas, mesmo em concentrações consideradas ambientalmente realistas (FERRAZ *et al.*, 2025).

Durante a pandemia de COVID-19, foram documentados muitos casos de aprisionamento (enredamento), ingestão e até mesmo a morte de aves e espécies marinhas em máscaras descartáveis, demonstrando que esses materiais se integram rapidamente aos fluxos ambientais e são confundidos com alimento ou incorporados ao *habitat* (FERRAZ *et al.*, 2025).

Esse cenário também merece atenção quando consideradas as estimativas de exposição humana. Estima-se que a ingestão anual humana possa variar entre 39.000 e 52.000 partículas de microplásticos; quando a inalação é considerada, esse número pode aumentar para aproximadamente 74.000 a 121.000 partículas por ano (YEE *et al.*, 2021). Ademais, além da exposição ambiental direta, evidências indicam um cenário adicional de exposição relacionado a materiais médicos presentes no organismo. Dispositivos e implantes médicos, como suturas, placas ósseas, tubos sanguíneos e válvulas podem liberar partículas durante processos de degradação e desgaste, indicando que a exposição também pode ocorrer diretamente no interior do organismo (SHI *et al.*, 2024).

Nesse contexto, SHI *et al.*, (2024) investigaram a liberação de microplásticos a partir de três suturas absorvíveis à base de ácido poliglicólico (PGA), com base no teor de ácido glicólico: PGA 100, PGA 90 e PGA 75, e duas suturas não absorvíveis (PP e PA) por meio de ensaios *in vitro* em fluido corporal simulado (SBF), sob condições controladas de temperatura e agitação, a fim de reproduzir o ambiente fisiológico. Durante o experimento, as partículas liberadas foram coletadas e caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), permitindo a análise de sua morfologia e tamanho.

Os resultados demonstraram que suturas compostas por PP e PA não apresentaram liberação de MPs. Em contrapartida, suturas à base de PGA liberaram MPs durante o processo de degradação, sendo observada uma maior liberação para a PGA 100, seguida pela PGA 90 e PGA 75. Além disso, foram identificadas partículas em formato de bastonete com diâmetros próximos de 10 µm nas suturas

de PGA 100 e PGA 90. Esse resultado merece atenção, uma vez que a literatura indica que partículas com dimensões inferiores a 10 μm podem transpor barreiras biológicas, migrando da cavidade intestinal para sistemas linfático e circulatório, o que favorece sua distribuição sistêmica e possível acúmulo em tecidos (SHI *et al.*, 2024).

Essas partículas também apresentam elevada relevância química e biológica que é ampliada por sua capacidade de interagir e sorver contaminantes ambientais, tanto químicos quanto biológicos (MOHANA *et al.*, 2023). Isto ocorre devido à maior área superficial e reatividade em comparação com o material não fragmentado, em razão de suas dimensões micrométricas e nanométricas (<5 μm para MPs e <1 μm para NPs).

Quando considerados os MNPs provenientes de materiais de origem médica, estes podem atuar como vetores para transmissão de doenças, seja pela contaminação do material, seja pela interação com o meio por interações eletrostáticas ou mecanismos de sorção que ocorrem quando moléculas contaminantes se fixam na superfície dos microplásticos por meio de interações como forças de *van der Waals*, interações iônicas e estéricas (GOSWAMI *et al.*, 2024). Esse processo é favorecido pela baixa polaridade e natureza hidrofóbica dos MNPs, permitindo a retenção e posterior mobilização de poluentes no ambiente aquático, atmosférico e/ou terrestre, alcançando sistemas alimentares (YEE *et al.*, 2021; GOSWAMI *et al.*, 2024). A tabela 3 apresenta uma relação de alguns produtos químicos sorvidos por MNPs (MOHANA *et al.*, 2023).

Tabela 3: Interação entre microplásticos e nanoplásticos e contaminantes químicos no ambiente

Polímeros	Classes químicas adsorvidas
Poliétileno (PE)	HPAs, fármacos, antibióticos e compostos orgânicos voláteis
Poliestireno (PS)	Compostos orgânicos, HAPs, antibióticos e compostos orgânicos voláteis
Policloreto de Vinila (PVC)	Antibióticos, HPAs e compostos orgânicos voláteis
Polipropileno (PP)	Antibióticos e Poluentes orgânicos
Poliamida (PA)	Fármacos e pesticidas

Polibutileno Adipato

Tereftalato
(PBAT)

HPAs

Fonte: Adaptado de MOHANA *et al.*, (2023)

Esse cenário revela uma contradição relevante: materiais projetados para promover saúde e segurança podem, simultaneamente, atuar como fontes de exposição a contaminantes emergentes. Ainda que os benefícios clínicos sejam indiscutíveis, a ausência de compreensão aprofundada sobre os efeitos da liberação de MNPs no organismo evidencia uma lacuna crítica a longo prazo.

3.5 CONTAMINAÇÃO POR ADITIVOS QUÍMICOS

Aditivos químicos são amplamente empregados em materiais plásticos para melhorar seu desempenho e ajustar propriedades específicas (ZHANG *et al.*, 2024; CUADROS-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020; MADDELA *et al.*, 2023). Esses aditivos podem ser tanto substâncias orgânicas quanto inorgânicas (ZHANG *et al.*, 2024; CUADROS-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020; MADDELA *et al.*, 2023).

O uso recorrente desses aditivos visa aperfeiçoar propriedades poliméricas como cor, flexibilidade, resistência mecânica e durabilidade, características essenciais para viabilizar e ampliar a aplicação em diversos contextos (GOPINATH *et al.*, 2022). Devido à sua versatilidade e ampla aplicabilidade, os aditivos podem atuar em diferentes finalidades, como plastificantes, lubrificantes, antioxidantes, corantes, retardantes de chama, estabilizantes e agentes antimicrobianos (ZHANG *et al.*, 2024; CUADROS-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020). No entanto, apesar dos benefícios, a incorporação de aditivos pode causar alterações indesejáveis em algumas propriedades do material, incluindo características físico-químicas, processos de esterilização, biocompatibilidade, toxicidade e impactos ambientais (CUADROS-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020). Essas consequências são particularmente relevantes porque os aditivos plásticos têm recebido pouca atenção em relação às preocupações

ambientais, já que informações sobre as propriedades ambientais de apenas cerca de 25% desses compostos estão disponíveis (MADDELA *et al.*, 2023).

O comportamento dos aditivos nos polímeros está diretamente relacionado aos mecanismos de sorção: absorção e adsorção (COSTA *et al.*, 2023; CUADROS-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020). Na absorção, as moléculas do aditivo se concentram na matriz polimérica e se incorporam a sua estrutura, mantidas principalmente por forças de *van der Waals* (COSTA *et al.*, 2023; CUADROS-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020). Já na adsorção, os compostos permanecem retidos ou concentrados na interface entre a fase sólida do polímero e o meio adjacente, estabelecendo interações baseadas tanto em forças de *van der Waals* quanto em interações eletrostáticas (COSTA *et al.*, 2023; CUADROS-RODRÍGUEZ *et al.*, 2020).

Por não estarem quimicamente ligados à matriz polimérica, os aditivos podem ser liberados ao longo de todo o ciclo de vida do material plástico. Substâncias químicas, aditivos e plastificantes podem migrar para o meio externo e interagir com o conteúdo acondicionado (MOSHKIBID *et al.*, 2024).

Essa liberação pode causar impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade, além de limitar a reciclagem e comprometer um dos princípios da economia circular: manter materiais em ciclos fechados com qualidade e segurança equivalentes ao material original (WIESINGER; WANG; HELLWEG, 2021). Esse fenômeno tende a ser intensificado com o envelhecimento do material, já que a degradação promove a quebra da cadeia polimérica, facilitando a lixiviação dos aditivos (ZHANG *et al.*, 2024). Esse processo de lixiviação ocorre pela migração interna dos aditivos no plástico e por sua posterior liberação para o meio, como água, solo, alimentos e outros compartimentos ambientais (MADDELA *et al.*, 2023).

No contexto ambiental, o mecanismo começa com o descarte inadequado de plásticos, especialmente em lixões ou ambientes não controlados. Isso, somado à má gestão de resíduos e à longa permanência desses materiais no ambiente, contribui significativamente para a liberação dos aditivos (HAHLADAKIS *et al.*, 2018). Esses compostos têm sido associados a efeitos adversos em ambientes aquáticos, microrganismos do solo e plantas, levantando questões sobre o papel dos aditivos químicos como poluentes ambientais emergentes e seus impactos nos ecossistemas a longo prazo (ZHANG *et al.*, 2024).

A Tabela 4 mostra que diferentes classes de aditivos (plastificantes, retardantes de chama e estabilizantes) possuem composições distintas, mas convergem quanto aos riscos toxicológicos e ambientais, dentre eles efeitos endócrinos, genotóxicos e impactos sobre a biodiversidade (ZHANG *et al.*, 2024). Essa relação evidencia que a funcionalidade desses compostos está diretamente ligada a potenciais impactos negativos, reforçando a necessidade de uma avaliação crítica de seu uso, descarte e destino ambiental (ZHANG *et al.*, 2024).

Tabela 4: Aditivos plásticos e seus impactos

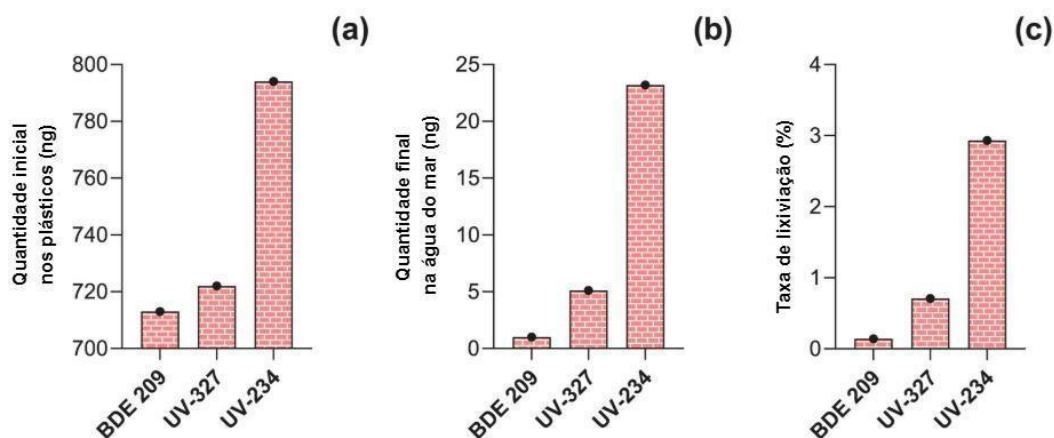
Tipo de aditivo	Função principal	Principais perigos toxicológicos
Plastificantes	Aumentar flexibilidade e ductilidade	Toxicidade reprodutiva, desregulação endócrina, neurotoxicidade e efeitos respiratórios
Retardantes de chama	Reduzir inflamabilidade e propagação de chamas	Genotoxicidade, hepatotoxicidade, toxicidade reprodutiva e desregulação endócrina
Estabilizantes	Prevenir degradação oxidativa e térmica	Carcinogenicidade, genotoxicidade, desregulação endócrina e efeitos cardiovasculares
Antimicrobianos	Inibir crescimento microbiano	Ecotoxicidade, neurotoxicidade, toxicidade reprodutiva e potencial carcinogênico

Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.*, 2024

A intensidade desse processo é influenciada pelas características do polímero, pelas propriedades físico-químicas dos aditivos e pelas condições ambientais. Além disso, plásticos mais escuros podem apresentar maior teor de pigmentos e outros aditivos associados à coloração, o que pode influenciar sua composição química e seu comportamento ambiental (MADDELA *et al.*, 2023). Para entender melhor esta dinâmica de transferência dos aditivos plásticos para o ambiente aquático, a Figura 7

ilustra a relação entre a quantidade de aditivos nos plásticos, sua ocorrência na água marinha e as taxas de lixiviação em experimentos de exposição, evidenciando a liberação dessas substâncias para o meio aquático.

Figura 7: Lixiviação de aditivos plásticos de microplásticos para a água marinha e sua biodisponibilidade em organismos aquáticos



Fonte: Adaptado de MADDELA *et al.*, (2023)

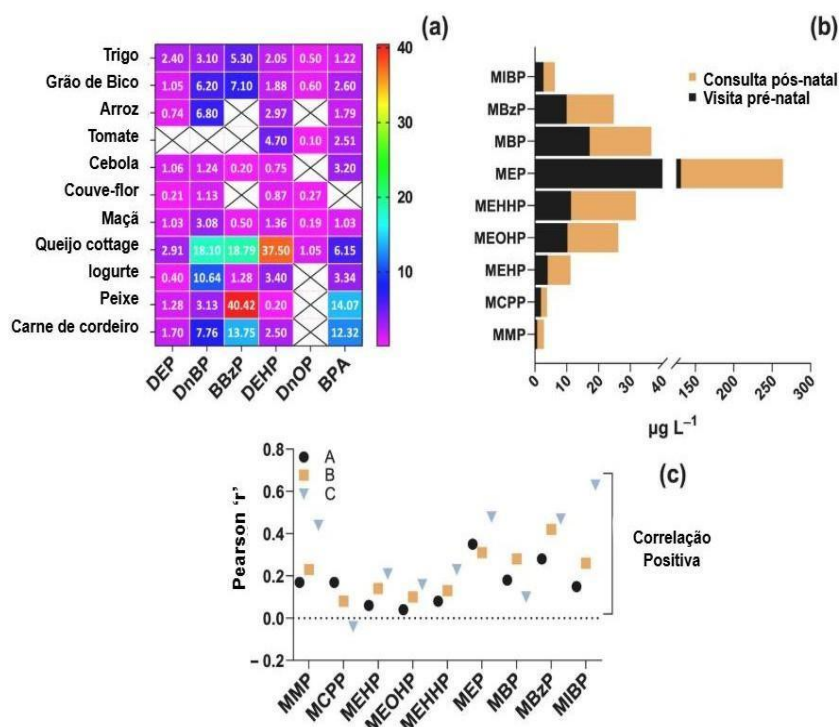
O processo de lixiviação se baseia na difusão, ou seja, as moléculas dos aditivos migram de uma região de maior concentração para uma região de menor concentração. A velocidade dessa migração é influenciada pelo peso molecular, já que moléculas de menor peso molecular apresentam maior mobilidade, e pela hidrofobicidade dos aditivos, já que essa propriedade determina a afinidade do composto pelo polímero e pelo meio circundante, influenciando sua solubilidade e, consequentemente, sua tendência de ser liberado para o ambiente (MADDELA *et al.*, 2023).

Assim, essas observações reforçam que a migração de aditivos é governada por suas propriedades físico-químicas e afinidade com o material polimérico, não apenas pela quantidade presente. Além disso, sua liberação é gradual e contínua ao longo do tempo (MADDELA *et al.*, 2023). Uma vez no ambiente, essas substâncias podem ser transferidas para diferentes matrizes e interagir com organismos vivos, interferindo em processos fisiológicos, metabólicos, de desenvolvimento e de reprodução. Além disso, o envelhecimento e o intemperismo dos plásticos intensificam a lixiviação, favorecendo a dispersão e ampliando seus efeitos ambientais (MADDELA *et al.*, 2023).

Os seres humanos também podem ser expostos a esses aditivos por múltiplas rotas, incluindo ingestão de água potável contaminada, liberação de microplásticos de embalagens e ingestão dietética (MADDELA *et al.*, 2023). Alimentos de origem animal tendem a apresentar concentrações mais elevadas de aditivos que os de origem vegetal, sendo o contato com materiais plásticos durante processamento, armazenamento e embalagem uma das principais fontes de contaminação (MADDELA *et al.*, 2023).

A Figura 8 mostra a ocorrência de plastificantes em diferentes alimentos e sua relação com a exposição humana. O mapa de calor evidencia a presença generalizada de compostos como dietil ftalato (DEP), dibutil ftalato (DBP), di(2-etilhexil) ftalato (DEHP), di-n-octil ftalato (DnOP) e bisfenol A (BPA) em diversos grupos alimentares, com maiores concentrações em produtos de origem animal e alimentos processados. A análise de metabólitos urinários indica exposição pré-natal e pós-natal, sendo maior após o nascimento (MADDELA *et al.*, 2023).

Figura 8: (a) Exposição humana a aditivos plásticos por alimentos; (b) biomonitoramento de metabólitos de ftalatos em períodos pré e pós-natais e (c) correlação positiva. (A) Amostras pré e pós-natais; (B) Amostragem coletada com intervalo de até um ano; e (C) Amostragem coletada com intervalo de até seis meses.



Fonte: Adaptado de MADDELA *et al.*, (2023)

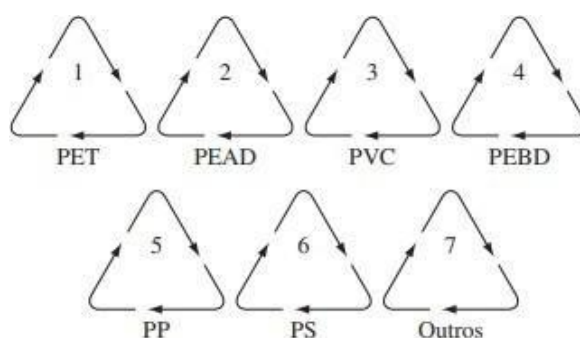
As correlações positivas entre consumo alimentar e níveis de metabólitos reforçam a dieta como via de exposição, destacando riscos à saúde, especialmente em populações vulneráveis como gestantes e crianças, como também, a exposição aos ftalatos não é evento isolado, mas tende a ser contínua e relativamente consistente ao longo do tempo, indicando fontes recorrentes de contato com esses compostos. (MADDELA *et al.*, 2023). Assim, embora os aditivos sejam cruciais para as propriedades dos plásticos médicos, uma avaliação crítica dos impactos na saúde e no meio ambiente é necessária, visando o desenvolvimento de soluções mais seguras e sustentáveis.

3.6 LIMITAÇÕES NO DESIGN

Um dos grandes desafios na reciclagem de plásticos médicos é a falta de identificação visual do tipo de polímero em produtos e embalagens. Isso dificulta a segregação e a rastreabilidade do produto na triagem final, comprometendo o encaminhamento adequado dos resíduos e, conseqüentemente, criando uma barreira ao processo de reciclagem (JOSEPH *et al.*, 2021).

Embora existam sistemas padronizados para identificação de polímeros em embalagens, como o *Resin Identification Code* (RIC), que auxiliam na triagem e classificação de materiais para reciclagem convencional e promovem a homogeneidade dos fluxos, sua aplicação nem sempre é suficiente para superar os desafios práticos, especialmente quando há falhas na rotulagem ou uso incorreto dos símbolos (COLTRO; DUARTE, 2013).

No Brasil, a norma ABNT NBR 13230:2008 padroniza símbolos para identificar a composição do plástico de cada produto. O objetivo é facilitar o reconhecimento do material e permitir a correta separação futura nos processos de triagem e reciclagem, conforme a composição do polímero. As Figuras 9 (Simbologia para Identificação de plásticos) e 10 (Simbologia para Identificação de multi plásticos) apresentam os símbolos de identificação. Em embalagens com mais de uma resina, cada polímero é representado por um número específico, distinguindo materiais de resina única daqueles formados por misturas. Plásticos que não se enquadram nos principais grupos são identificados pelo código 7. Essa simbologia permite uma identificação rápida e padronizada da composição básica dos plásticos, contribuindo para uma gestão mais adequada dos resíduos e aumentando a eficiência da reciclagem.

Figura 9: Simbologia para Identificação de plásticos

- 1 - PET - Polietileno tereftalato
- 2 - PEAD - Polietileno de alta densidade
- 3 - PVC - Policloreto de vinila
- 4 - PEBD - Polietileno de baixa densidade
- 5 - PP - Polipropileno
- 6 - PS - Poliestireno
- 7 - Outros

Fonte: Coltro; Duarte (2013)

Figura 10: Simbologia para Identificação de materiais compostos por múltiplos plásticos

PEAD / PEBD



PA / PET

Figura 1a — Embalagens constituídas por resinas com símbolo normalizado

Figura 1b — Embalagem constituídas por mais de uma resina

Fonte: ABNT NBR 13230:2008

Apesar da existência normativa, estudos sobre embalagens plásticas convencionais já apontam limitações significativas na aplicação dos sistemas de identificação de resinas. Coltro e Duarte (2013) realizaram um estudo com 509 embalagens plásticas para produtos alimentícios e não alimentícios no Brasil, avaliando a presença e correção dos símbolos de identificação. Os autores observaram que aproximadamente 50% das embalagens possuíam identificação, porém, aproximadamente 30% apresentavam informação incorreta (COLTRO; DUARTE, 2013).

No contexto de resíduos plásticos médicos, essa etapa é ainda mais crítica. A diversidade de polímeros na área da saúde dificulta a separação eficiente dos materiais, sendo um dos principais fatores limitantes à reciclagem (JOSEPH *et al.*, 2021). Pesquisas recentes, como a de Apevienyeku, Ampofo e Amoako (2024), que analisaram condições para reciclagem de resíduos plásticos médicos, revelaram dificuldades na determinação da composição polimérica e a ausência de mecanismos claros e padronizados de identificação e classificação de materiais (APEVIENYEKU; AMPOFO; AMOAKO, 2024).

Existem diferentes estratégias para aplicar a economia circular a plásticos na área da saúde, sendo o redesenho de produtos uma abordagem central. Essa estratégia propõe reformular o *design* de materiais e dispositivos médicos para ampliar sua circularidade ao longo do ciclo de vida (CANO *et al.*, 2025).

Essa abordagem vai além dos critérios tradicionais (função, esterilização e custo), incorporando aspectos como reutilização, reciclabilidade, durabilidade e gestão de resíduos. Assim, o *design* é concebido não apenas para garantir desempenho clínico e segurança, mas também para minimizar impactos ambientais e facilitar etapas posteriores como segregação, rastreabilidade e processamento dos materiais (CANO *et al.*, 2025).

4. CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho permitiu compreender que os desafios relacionados a reciclagem de plásticos médicos vão além de uma simples gestão dos resíduos gerados. Fatores como a diversidade polimérica, a presença de substâncias químicas potencialmente nocivas, as limitações nos processos de reciclagem e a cultura dos descartáveis estão interligados. Em paralelo, é evidente que esses materiais desempenham funções essenciais para garantir a segurança de pacientes, profissionais de saúde e usuários. Logo, torna-se necessário equilibrar benefícios clínicos com a redução de seus impactos.

Espera-se, assim, que este trabalho contribua para ampliar a discussão acerca da sustentabilidade e incentive o desenvolvimento de práticas fundamentadas na economia circular. Nesse contexto, destacam-se estratégias como a seleção criteriosa de materiais, priorizando polímeros compatíveis com os processos de reciclagem reduzindo estruturas multicomponentes de difícil recuperação; o reaproveitamento dos galhos gerados a partir das sobras dos processos de injeção em novas aplicações; a substituição gradual de polímeros clorados, como o PVC, e de aditivos potencialmente tóxicos, como o DEHP, por alternativas mais seguras; a identificação adequada dos materiais e embalagens por meio de sistemas de rotulagem e codificação que facilitem sua segregação e reciclagem; a redução do uso de colorações em dispositivos médicos de forma a diminuir a quantidade de aditivos químicos; e a separação das embalagens plásticas dos resíduos potencialmente contaminados, permitindo seu encaminhamento para cadeias de reciclagem.

Além disso, a redução na geração de resíduos deve ser considerada uma prioridade, por meio da avaliação crítica do uso excessivo ou inadequado de materiais descartáveis, incluindo EPIs, bem como do desenvolvimento de produtos mais leves e eficientes, os quais reduzem o volume gerado. Por fim, cabe ressaltar a reavaliação do uso de itens não médicos descartáveis, especialmente aqueles destinados ao contato com alimentos, incentivando sua substituição por alternativas reutilizáveis quando tecnicamente viáveis. Em conjunto, essas medidas podem contribuir para a diminuição dos impactos ambientais dos plásticos médicos sem comprometer os elevados padrões de segurança exigidos pelos serviços de saúde.

5. REFERÊNCIAS

PARASHAR, N; HAIT, S. Plastics in the time of COVID-19 pandemic: protector or polluter? **Science of the Total Environment**, v. 759, 2021. DOI:

10.1016/j.scitotenv.2020.144274. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144274>

JOSEPH, B. et al. Recycling of medical plastics. In: **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 4, n. 3, p. 199-208, 2021. DOI:

10.1016/j.aiepr.2021.06.003. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.003>

CHO, Y. et al. Achieving the sustainable waste management of medical plastic packaging using a life cycle assessment approach. **Heliyon**, v. 10, n. 19, 2024. DOI:

10.1016/j.heliyon. 2024.e38185. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38185>

ALRAZEN, H. A. et al. Uma revisão dos caminhos, limitações e perspectivas da reciclagem de resíduos plásticos. **Materials for Renewable and Sustainable Energy**, v. 14, p. 50, 2025. DOI: 10.1007/s40243-025-00328-4. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s40243-025-00328-4>

HAHLADAKIS, J. N. et al. An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. **Journal of Hazardous Materials**, v. 344, p. 179-199, 2018. DOI:

10.1016/j.jhazmat.2017.10.014. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>

SIRAJ, K. T. et al. Análise do potencial de reciclabilidade de resíduos plásticos médicos para a implementação da economia circular: Faculdade de Medicina do Hospital Adama, Etiópia. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, p. 12057-12070, 2025. DOI: 10.1007/s13762-024-06315-y.

Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06315-y>

ACHILIAS, D. S. Thermo-chemical recycling of plastics as a sustainable approach to the plastic waste issue. **Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration**, v. 10, n. 4, p. 2605-2618, 2025. DOI: 10.1007/s41207-025-00800-7.

Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41207-025-00800-7>

TITONE, V.; GULINO, E. F.; LA MANTIA, F. P. Recycling of heterogeneous mixed waste polymers through reactive mixing. **Polymers**, v. 15, n. 6, 2023. DOI: 10.3390/polym15061367. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15061367>

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

DORIGATO, A. Recycling of polymer blends. In: **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 4, n. 2, p. 53-69, 2021. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.02.005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.02.005>

WU, X.; GAO, Q.; LI, W. Design for recycling: a systematic review of approaches for enhancing product recyclability. **Sustainability (Switzerland)**, v. 17, n. 5, 2025. DOI: 10.3390/su17051790. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su17051790>

LEE, B.-K.; ELLENBECKER, M. J.; MOURE-ERASO, R. Analyses of the recycling potential of medical plastic wastes. **Waste Management**, v. 22, n. 5, p. 461-470, 2002. DOI: 10.1016/S0956-053X(02)00006-5. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00006-5)

FERRAZ, G. M. et al. From protection to pollution: the impact of mask use on micro(nano)plastic release. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 36, n. 12, 2025. DOI: 10.21577/0103-5053.20250165. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20250165>

NEMATOLLAHI, H.; TUYSSERKANI, M.; NEMATOLLAHI, A. Medical waste management in the modern healthcare era: a comprehensive review of technologies, environmental impact, and sustainable practices. **Results in Engineering**, v. 28, 2025. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107210. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107210>

DAS, A. K. et al. COVID-19 pandemic and healthcare solid waste management strategy – a mini-review. **Science of the Total Environment**, v. 778, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146220. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146220>

SAHOO, S. et al. Biomedical waste plastic: bacteria, disinfection and recycling technologies—a comprehensive review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 21, n. 1, p. 1141-1158, 2024. DOI: 10.1007/s13762-023-04975-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04975-w>

PÉPIN, J. et al. Evolution of the global burden of viral infections from unsafe medical injections, 2000–2010. **PLOS ONE**, v. 9, n. 6, e99677, 2014. DOI: 10.1371/journal.pone.0099677. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099677>

MENG, J. et al. Plastic waste as the potential carriers of pathogens. **Current Opinion in Food Science**, v. 41, p. 224-230, 2021. DOI: 10.1016/j.cofs.2021.04.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.04.016>

BOLAN, S. et al. Review on distribution, fate, and management of potentially toxic elements in incinerated medical wastes. **Environmental Pollution**, v. 321, 2023. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121080. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121080>

EPHRAIM, I.; ITA, A.; EUSEBIUS, O. Investigation of soils affected by burnt hospital wastes in Nigeria using PIXE. **SpringerPlus**, v. 2, n. 1, 2013. DOI: 10.1186/2193-1801-2-208. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-208>

KHANNA, R. et al. Microplastics and nanoplastics as environmental contaminants of emerging concern: potential hazards for human health. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 19, 2024. DOI: 10.3390/su16198704. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16198704>

AMOBONYE, A. et al. Environmental impacts of microplastics and nanoplastics: a current overview. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, 2021. DOI: 10.3389/fmicb.2021.768297. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.768297>

MOHANA, A. A. et al. Generation and consequence of nano/microplastics from medical waste and household plastic during the COVID-19 pandemic.

Chemosphere, v. 311, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.137014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137014>

RAY, S. S. et al. Microplastics waste in environment: a perspective on recycling issues from PPE kits and face masks during the COVID-19 pandemic.

Environmental Technology and Innovation, v. 26, 2022. DOI: 10.1016/j.eti.2022.102290. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102290>

GOSWAMI, S. et al. The alarming link between environmental microplastics and health hazards with special emphasis on cancer. **Life Sciences**, v. 355, 2024. DOI: 10.1016/j.lfs.2024.122937. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2024.122937>

YEE, M. S. L. et al. Impact of microplastics and nanoplastics on human health. *Nanomaterials*, v. 11, n. 2, e496, 2021. DOI: 10.3390/nano11020496. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano11020496>

SHI, Y. et al. Micro and nano plastics release from a single absorbable suture into simulated body fluid. *Journal of Hazardous Materials*, v. 466, 2024. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2024.133559. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133559>.

ZHANG, L. et al. Plastic additives as a new threat to the global environment: research status, remediation strategies and perspectives. **Environmental Research**, v. 263, 2024. DOI: 10.1016/j.envres.2024.120007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120007>

CUADROS-RODRÍGUEZ, L.; LAZÚEN-MUROS, M.; RUIZ-SAMBLÁS, C.; NAVAS-IGLESIAS, N. Leachables from plastic materials in contact with drugs. State of the art and review of current analytical approaches. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 583, 2020. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2020.119332. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119332>

MADDELA, N. R. et al. Additives of plastics: entry into the environment and potential risks to human and ecological health. **Journal of Environmental Management**, v. 348, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119364. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119364>

GOPINATH, P. M. et al. Plastic particles in medicine: a systematic review of exposure and effects to human health. **Chemosphere**, v. 303, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.135227. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135227>

COSTA, J. P. da et al. Plastic additives and microplastics as emerging contaminants: mechanisms and analytical assessment. **TrAC – Trends in Analytical Chemistry**, v. 158, 2023. DOI: 10.1016/j.trac.2022.116898. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116898>

MOSHKIBID, E. et al. Biodegradable alternatives to plastic in medical equipment: current state, challenges, and the future. **Journal of Composites Science**, v. 8, n. 9, 2024. DOI: 10.3390/jcs8090342. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jcs8090342>

WIESINGER, H.; WANG, Z.; HELLWEG, S. Deep dive into plastic monomers, additives, and processing aids. **Environmental Science & Technology**, v. 55, n. 13, p. 9339-9351, 2021. DOI: 10.1021/acs.est.1c00976. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00976>

COLTRO, L.; DUARTE, L. C. Reciclagem de embalagens plásticas flexíveis: contribuição da identificação correta. **Polímeros**, v. 23, n. 1, p. 128-134, 2013. DOI: 10.1590/S0104-14282013005000008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282013005000008>

APEVIENYEKU, H. K.; AMPOFO, J.; AMANKWAA AMOAKO, J. Recycling potential of medical plastic waste. **Discover Environment**, v. 2, n. 1, 2024. DOI: 10.1007/s44274-024-00109-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44274-024-00109-2>

SILVA DE SOUZA LIMA CANO, N. et al. Advancing the circular economy of healthcare plastics: a systematic literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 219, 2025. DOI: 10.1016/j.resconrec.2025.108317. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108317>