



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

HENRIQUE BARBOZA DE ARAÚJO

**APLICAÇÕES DA FÍSICA NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE
MICROPLÁSTICOS**

FORTALEZA

2026

HENRIQUE BARBOZA DE ARAÚJO

APLICAÇÕES DA FÍSICA NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE
MICROPLÁSTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Física do Centro de
Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Mendes Aguiar
Paixão

FORTALEZA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A689a Araújo, Henrique Barboza de.
Aplicações da física na detecção e caracterização de microplásticos / Henrique Barboza de Araújo. – 2026.
39 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Física, Fortaleza, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Jefferson Mendes Aguiar Paixão.

I. microplásticos; poluição ambiental; saúde humana; espectroscopia FTIR; Espectroscopia Raman;
física aplicada. I. Título.

CDD 530

HENRIQUE BARBOZA DE ARAÚJO

APLICAÇÕES DA FÍSICA NA DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE
MICROPLÁSTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Física do Centro de
Ciências da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do grau de
licenciado em Física.

Aprovada em: 14/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jefferson Mendes Aguiar Paixão (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Marciano Rufino
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Fernando Antônio Amaral Pimentel
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos, que estiveram ao meu lado compartilhando alegrias, desafios e conquistas, deixo meu sincero agradecimento por cada palavra de apoio, por cada gesto de carinho e por tornarem essa jornada mais leve e significativa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu muitíssimo obrigado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela vida, pela sabedoria e pela força concedida ao longo desta jornada acadêmica. Sua presença foi essencial para que eu pudesse superar os desafios e concluir esta etapa com perseverança e fé.

Da mesma forma, meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. Jefferson Mendes Aguiar Paixão, pela orientação segura, criteriosa e constante ao longo de todas as etapas deste trabalho. Sua competência acadêmica, rigor científico e disponibilidade foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa e para o aprofundamento dos conhecimentos aqui apresentados. Sou profundamente grato pelos ensinamentos transmitidos, pelas contribuições valiosas e pelo incentivo contínuo, que foram decisivos para minha formação acadêmica e profissional.

À minha família, expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo e pela compreensão nos momentos de ausência. O carinho e a confiança depositados em mim foram fundamentais para a concretização deste trabalho. À minha esposa, Michelle Sales, a quem devo a vida de meu filho e o incentivo nos momentos mais difíceis e duros da minha vida, agradeço-lhe de coração, pois jamais conseguiria retribuir à altura. Ao meu filho, Carlos Henrique, que, no momento, ainda não compreende o sustentáculo que tem sido em minha vida, sou imensamente grato a Deus por tê-lo confiado a mim.

À minha mãe, que também foi meu pai ao longo de uma vida, não teria conseguido caminhar nem mesmo alguns passos sem seu apoio incondicional. Nossas diferenças e, às vezes, indiferenças de minha parte jamais a fizeram desistir de desejar e lutar pelo melhor para mim; obrigado por tudo. Eu te amo.

À minha avó Irene (*in memoriam*), que sempre esteve próxima da minha adolescência, corrigindo-me e chamando-me de “rique” e que, com certeza, em seu merecido lugar de descanso, está muito feliz pelas conquistas de seu neto roqueiro.

Sou profundamente grato a Jim Morrison (*in memoriam*), pois, no ascender das luzes da adolescência, por meio de sua poesia lísergica, ensinou-me que a verdadeira libertação vem apenas com a leitura, e com a leitura de muitos livros.

Aos amigos, agradeço pela companhia, pela motivação constante e pelo compartilhamento de experiências que tornaram este percurso mais leve e enriquecedor.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento e a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

Neste trabalho, analisamos os plásticos e os microplásticos (MP). Enfatizamos seus processos de formação, distribuição ambiental e persistência nos ecossistemas, bem como os principais impactos associados à contaminação por MPs no meio ambiente e os riscos potenciais à saúde humana. O estudo abordou mecanismos de exposição, bioacumulação e possíveis efeitos toxicológicos decorrentes da ingestão e inalação dessas partículas. Ademais, demonstramos como a Física contribui para a identificação e caracterização dos MPs por meio de técnicas espectroscópicas, com destaque para a Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e a espectroscopia Raman, apresentando a fundamentação física baseada na interação da radiação eletromagnética com os modos vibracionais moleculares, o que possibilitou a distinção e a classificação de diferentes tipos de polímeros, evidenciando o papel da Física no monitoramento e no enfrentamento da problemática dos MPs.

Palavras-chave: microplásticos; poluição ambiental; saúde humana; espectroscopia FTIR; Espectroscopia Raman; física aplicada.

ABSTRACT

In this work, plastics and microplastics (MPs) are analyzed, with emphasis on their formation processes, environmental distribution, and persistence in ecosystems, as well as the main impacts associated with MP contamination in the environment and the potential risks to human health. The study addresses exposure pathways, bioaccumulation, and possible toxicological effects resulting from the ingestion and inhalation of these particles. Furthermore, it is demonstrated how Physics contributes to the identification and characterization of MPs through spectroscopic techniques, particularly Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Raman spectroscopy. The physical foundations of these techniques are presented, based on the interaction between electromagnetic radiation and molecular vibrational modes, which enables the distinction and classification of different types of polymers, highlighting the role of Physics in monitoring and addressing the microplastics problem.

Keywords: microplastics; environmental pollution; Human health; FTIR spectroscopy; Raman Spectroscopy; applied physics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção anual de resinas e fibras cresceu 230 vezes em 70 anos.	13
Figura 2 – Problemas ambientais decorrentes da poluição.	14
Figura 3 – Microplástico separado	17
Figura 4 – Processo de degradação e transporte de microplástico.	18
Figura 5 – Escala comparativa.	19
Figura 6 – A Grande ilha de lixo no oceano pacífico.	21
Figura 7 – A presença do microplástico no corpo humano	22
Figura 8 – Vibrações moleculares e espalhamento Raman.	27
Figura 9 – Curva padrão de cada substância após feixe de luz	30
Figura 10 – Microplástico descoberto em leite materno.	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	PLÁSTICOS	13
3	MICROPLÁSTICOS	16
4	PROBLEMAS DECORRENTES DOS MICROPLÁSTICOS	21
5	A FÍSICA COMO VETOR DE COMBATE AO MICROPLÁSTICO	24
5.1	Fundamentação física e matemática para aplicação da espectroscopia	26
5.1.1	<i>Interação radiação-matéria</i>	26
5.1.2	<i>Modos vibracionais e equação do oscilador harmônico</i>	26
5.1.3	<i>Espectroscopia Raman - Espalhamento inelástico</i>	27
5.1.4	<i>Intensidade Raman</i>	28
5.1.5	<i>Espectroscopia FTIR: absorção e lei de Beer–Lambert</i>	28
6.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MP POR ESPECTROSCOPIA	29
7.	CONCLUSÃO	30
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A poluição causada por materiais plásticos tornou-se um problema de grande importância ambiental e socioeconômica, principalmente devido à ineficiência na gestão dos resíduos sólidos, entre outros fatores associados ao consumo e descarte inadequado. Dentro desse contexto, ganha destaque a contaminação proveniente de partículas plásticas muito pequenas, com dimensões na faixa micrométrica até milimétrica.

O primeiro registro da presença dessas partículas no ambiente foi documentado em 1972, quando fragmentos de plástico foram encontrados presos em redes de coleta de plâncton nas águas costeiras da região da Nova Inglaterra, nos Estados Unidos. Nesse mesmo ano, fragmentos de polietileno e poliestireno também foram detectados no litoral do Rio Grande do Sul, no Brasil (Itaipu Binacional, 2023).

Apesar desses registros iniciais, o tema ainda despertava pouco interesse científico, resultando em um número reduzido de estudos durante a década de 1970. Somente em 2004 tivemos o conhecimento dos microplásticos (MPs). Entre 2010 e 2020 foi quando identificaram a presença de MP em toda a cadeia alimentar, mas só a partir de 2023 que as pesquisas se voltaram para mapear seus impactos na saúde humana (Thompson, 2004).

Os MPs têm grande potencial para alterar a biota e o ecossistema oceânico do nosso planeta como um todo, diz o físico Paulo Artaxo, do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) e membro da coordenação do Programa FAPESP de Pesquisa em Mudanças Climáticas Globais. Esse tipo de poluição tem efeitos ainda não totalmente entendidos e quantificados. Precisamos de muita pesquisa científica para caracterizar o material e estudar a extensão de sua distribuição, suas concentrações, seus efeitos nos ecossistemas e sobre os seres vivos e como removê-lo do meio ambiente (FAPESP, 2019).

Da fossa das Marianas, no oceano Pacífico, aos Alpes, das praias de Fernando de Noronha às grandes metrópoles, os MPs estão em toda parte, em geral sem serem vistos. Análises cada vez mais detalhadas apontam para o caráter onipresente desses fragmentos, esferas, pedacinhos de filmes ou de fibras de plástico com até 5 milímetros de diâmetro ou extensão e frequentemente micrométricos. Eles já foram encontrados não apenas no ar que se respira, em ambientes terrestres, marinhos e reservas de água doce, mas também na água de torneira e engarrafada, no sal marinho, no mel, na cerveja, nos frutos do mar

e em peixes consumidos pelo homem e, por consequência, nas fezes humanas (FAPESP, 2019).

Um estudo liderado por Turra descobriu em 2014, na região de Santos, litoral paulista, pallets, pequenas esferas usadas para produzir materiais plásticos, enterrados a até 2 metros de profundidade na areia da praia, indicando um problema muito maior do que o pensado até então, quando se acreditava que eles se limitavam à superfície. Na mesma região, 75% dos mexilhões tinham registro de ingestão de MPs. Pesquisas baseadas em experimentos de laboratório indicam que as partículas plásticas podem afetar o crescimento, a reprodução, o desenvolvimento e mesmo a sobrevivência de organismos marinhos (FAPESP, 2019).

Com a crescente preocupação sobre os impactos ecológicos dessas partículas em diversos ecossistemas, os estudos sobre poluição plástica começaram a incorporar novas abordagens.

O plástico é um material polimérico amplamente utilizado pela sociedade contemporânea devido às suas propriedades físicas e químicas, como leveza, durabilidade, baixo custo de produção e versatilidade de aplicações. Desde sua popularização no século XX, os plásticos passaram a integrar praticamente todos os setores produtivos, incluindo embalagens, construção civil, indústria automotiva, medicina e tecnologia. No entanto, o crescimento exponencial de sua produção e consumo, aliado à baixa taxa de reciclagem e ao descarte inadequado, tem resultado em sérios impactos ambientais, tornando os resíduos plásticos um dos principais desafios ambientais da atualidade.

Um dos aspectos mais preocupantes relacionados aos resíduos plásticos é a formação dos MPs, definidos como partículas com dimensões inferiores a 5 mm. Esses materiais podem ser originados tanto pela deterioração e fragmentação de plásticos maiores, causada por processos físicos, químicos e biológicos — como radiação ultravioleta, abrasão mecânica e ação microbiana — quanto pela produção intencional de MPs primários, empregados em produtos industriais, cosméticos e abrasivos. Uma vez liberados no ambiente, esses fragmentos apresentam elevada persistência, devido à resistência à degradação natural, favorecendo sua ampla dispersão em diferentes compartimentos ambientais.

Os impactos dos plásticos e MPs nos ecossistemas aquáticos são amplamente documentados na literatura científica. Nos oceanos, rios e ambientes costeiros, esses materiais contribuem para a degradação dos habitats, afetam a fauna marinha por ingestão

ou emaranhamento e atuam como vetores para a adsorção e transporte de contaminantes químicos e microrganismos patogênicos. Além disso, a presença de MPs em cadeias alimentares aquáticas representa uma ameaça crescente à biodiversidade e à estabilidade dos ecossistemas, evidenciando a gravidade desse problema em escala global (Oceana, 2024).

Do ponto de vista da saúde humana, os MPs despertam preocupação devido ao seu potencial de ingestão, inalação e absorção. Estudos recentes indicam a presença dessas partículas em alimentos, água potável e até mesmo em tecidos humanos, levantando questionamentos sobre seus efeitos toxicológicos. Os riscos associados incluem inflamações, estresse oxidativo, alterações celulares e a possível liberação de aditivos químicos presentes nos polímeros, como plastificantes e retardantes de chama. Embora muitos mecanismos ainda estejam em investigação, a crescente evidência científica reforça a necessidade de métodos confiáveis para o monitoramento e a identificação desses contaminantes (FIOCRUZ, 2025).

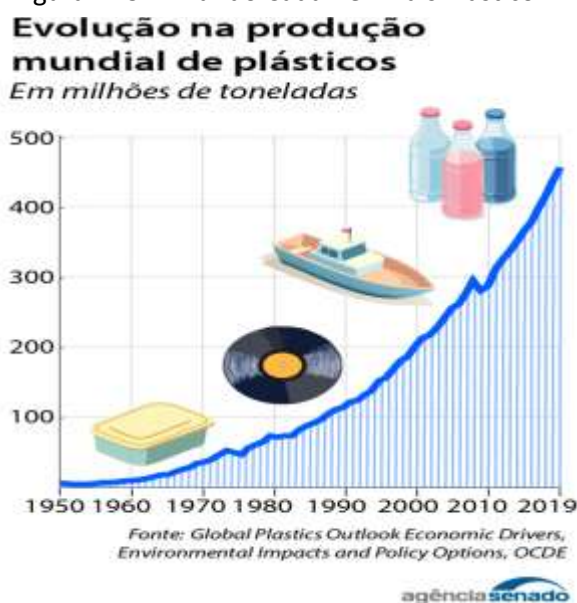
Nesse contexto, a Física desempenha um papel fundamental na detecção e caracterização dos MPs no meio ambiente, especialmente por meio de técnicas espectroscópicas. Métodos como a Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e a espectroscopia Raman permitem identificar a composição química dos polímeros a partir da interação da radiação eletromagnética com a matéria. Essas técnicas baseiam-se em fundamentos físicos sólidos, incluindo as equações de Maxwell, que descrevem a propagação das ondas eletromagnéticas, e a transformada de Fourier, utilizada na análise espectral dos sinais obtidos. Dessa forma, a aplicação da Física contribui significativamente para o avanço do conhecimento científico e para o desenvolvimento de estratégias eficazes no enfrentamento da problemática dos MPs.

2 PLÁSTICOS

Os plásticos são materiais poliméricos sintéticos caracterizados por serem leves, resistentes, impermeáveis e de longa durabilidade. Podem ser produzidos em versões rígidas ou flexíveis, além de transparentes ou coloridas, e possuem custo relativamente baixo. Devido a essas propriedades vantajosas, seu uso se expandiu para praticamente todos os setores da sociedade contemporânea. Entretanto, a gestão inadequada dos resíduos sólidos faz com que esses materiais acabem se acumulando no ambiente, tornando-se contaminantes presentes em praticamente todos os ecossistemas.

A produção global de plásticos, iniciada por volta de 1950, aumentou de forma expressiva ao longo dos últimos 60 anos. Estima-se que aproximadamente 9,2 bilhões de toneladas de plástico virgem tenham sido fabricadas para as mais diversas finalidades nesse período. Como observado na Figura 1, os dados disponíveis indicam que, entre o início da produção e o ano de 2017, foram geradas cerca de 7 bilhões de toneladas de resíduos plásticos. Desse total, apenas 9% passaram por processos de reciclagem, 12% foram destinados à incineração e os demais 79% acabaram acumulados em aterros ou liberados diretamente no ambiente, evidenciando falhas significativas no saneamento e na gestão de resíduos sólidos. Projeções futuras indicam que, se o ritmo de produção permanecer elevado e não houver melhorias efetivas no gerenciamento desses materiais, aproximadamente 12 bilhões de toneladas de resíduos plásticos poderão ser descartadas no ambiente até 2050 (Science ADvances, 2022).

Figura 1: Um Mundo Cada Vez Mais Plástico



Os plásticos mais frequentes no ambiente incluem os termoplásticos polipropileno (PP), polietileno (PE), em suas formas de baixa densidade (PEBD) e alta densidade (PEAD), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), politereftalato de etileno (PET) e poliamida (PA), além do poliuretano (PU), um polímero termorrígido amplamente utilizado.

A poluição por plásticos é considerada pela Organização das Nações Unidas (ONU) a segunda maior ameaça à biodiversidade global, ficando atrás apenas das mudanças climáticas. Na América Latina, o Brasil é o maior poluidor dos oceanos, uma vez que descarta cerca de 1,3 milhão de toneladas de resíduos plásticos anualmente. Os dados constam no relatório “Fragmentos da Destruição: Impactos da Poluição Plástica à Biodiversidade Marinha Brasileira, produzido pela Oceana Brasil”. Conforme o ranking, produzido pela Oceana Brasil e o ranking global, o país ocupa o oitavo lugar entre os maiores poluidores de plástico no mundo. Ou seja, o país é responsável por 8% da poluição global dos oceanos (AMDA, 2025).

Figura 2: Tartaruga em Meio ao Lixo no Mar de Vitória



Fonte: Vitor Jubini, G1 - Globo, 2023

Os impactos ecológicos, ambientais, estéticos e econômicos associados ao descarte inadequado de resíduos plásticos, conforme Figura 2, têm consolidado a poluição plástica como um tema prioritário de pesquisa em escala global. Dado que o plástico é

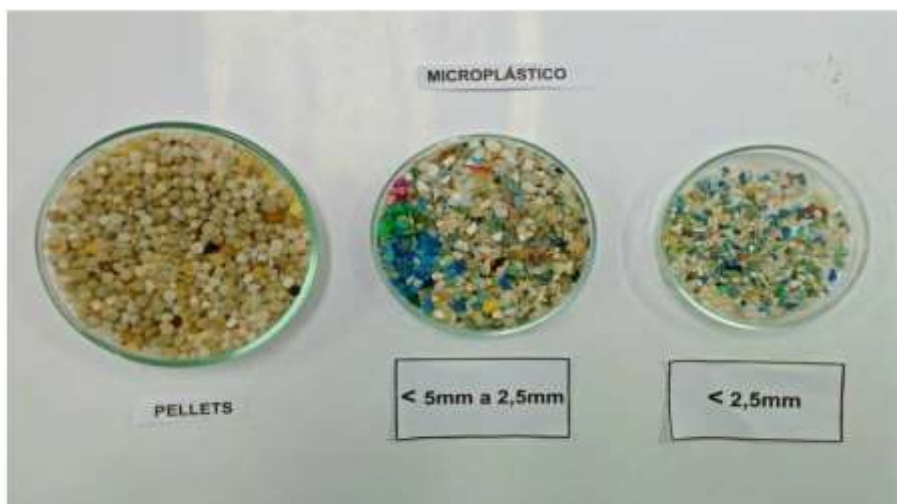
um dos materiais mais utilizados mundialmente, sua contribuição para a massa total de resíduos sólidos é expressiva. Além disso, estima-se que cerca de 80% desses resíduos tenham origem terrestre e acabem transportados para os oceanos (Marinha do Brasil, 2019). Como consequência, formaram-se ao menos cinco grandes zonas de acúmulo de plástico em vórtices oceânicos, onde toneladas de detritos flutuantes se concentram, causando danos significativos aos ecossistemas marinhos, incluindo a mortalidade de numerosas espécies, conforme relatado pelo Panorama da Biodiversidade Global da ONU (Camila Boehm, 2018).

3 MICROPLÁSTICOS

Os MPs podem ser classificados como primários ou secundários conforme sua fonte de origem. Os MPs primários são aqueles produzidos intencionalmente para ter dimensões de até 5 mm e, por isso, já são liberados no ambiente nesse tamanho, conforme (FIG. 3). Eles podem ocorrer na forma de microesferas microscópicas, amplamente utilizadas na formulação de cosméticos, incluindo produtos que contêm glitter, que têm recebido atenção especial, e em itens de higiene pessoal, como esfoliantes, sabonetes e cremes dentais. Além dessas aplicações, os MPs também são empregados na indústria farmacêutica, na fabricação de plásticos como matéria-prima (pellets) e em diversos processos da indústria química, especialmente como agentes abrasivos (Marcelo; Barbara; Tereza; 2022).

Os MPs primários, por serem produzidos intencionalmente em dimensões microscópicas, apresentam elevada mobilidade no ambiente, o que favorece sua dispersão tanto no solo quanto no ar, podendo ser facilmente ressuspensos pelo vento, especialmente em áreas urbanas e industriais, sendo transportados por longas distâncias e posteriormente depositados por sedimentação seca ou precipitação, contribuindo para a contaminação de diferentes ecossistemas. Os MPs são formados por fontes geradoras primárias e secundárias. As fontes primárias são aquelas que possuem MPs em sua composição, como cosméticos – cremes esfoliantes e produtos de higiene pessoal – pasta de dentes, conforme pesquisa da (UNISINUS, 2017) e mostrado na Figura 3. As fontes secundárias geram o MPs a partir do processo da fragmentação e/ou sua decomposição pelos raios solares ultravioletas (UV) (César; Malavolta; Nogueira; Antônio; Patrocínio; 2017).

Figura 3: Microplástico Separado, Qualificado e Classificado por Tamanho

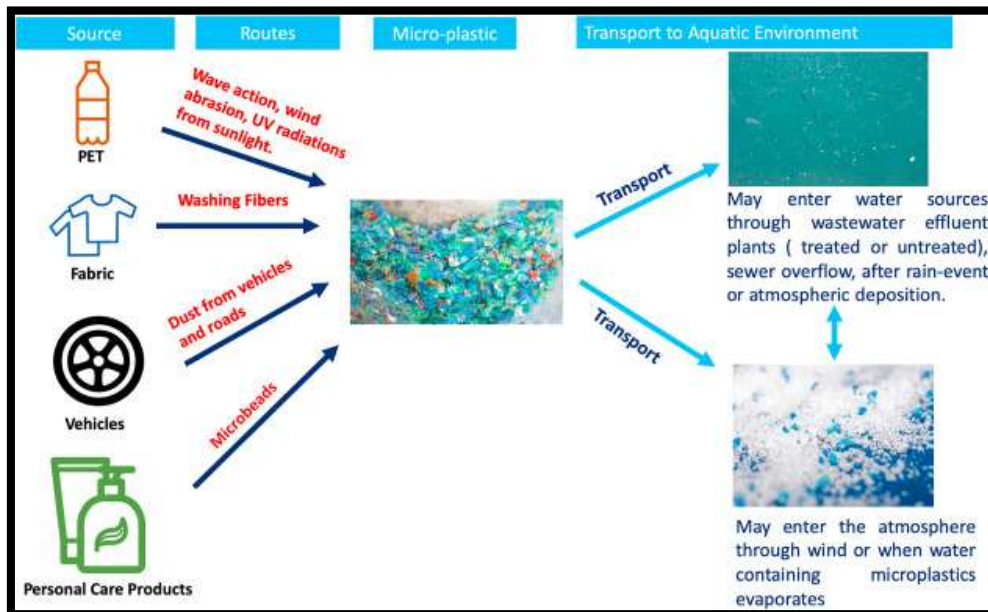


Fonte: João Malavolta, UNISINOS, 2017

Por outro lado, microplásticos (MPs) secundários são aqueles originados da fragmentação dos resíduos plásticos de maior dimensão, como embalagens e outros objetos, que, ao serem expostos às condições ambientais e a diversos agentes estressores, se degradam progressivamente até atingir a escala dos MPs. A degradação de um polímero está associada ao rompimento de ligações químicas covalentes, seja na cadeia principal ou em cadeias laterais. Esse rompimento ocorre devido à formação de espécies reativas, predominantemente radicais livres, que também promovem a continuidade do processo degradativo (Marcelo; Barbara; Tereza; 2022).

Observando a Figura 4, percebemos como os MPs secundários são comumente encontrados no cotidiano como resultado da fragmentação de objetos plásticos maiores expostos ao uso e à degradação ambiental. Eles estão presentes no pó doméstico, originados do desgaste de embalagens, móveis e utensílios plásticos, bem como de fibras liberadas por roupas sintéticas durante o uso. Também podem ser detectados no ar urbano, na água potável, em alimentos como sal, frutos do mar e produtos industrializados, além de estarem associados ao desgaste de pneus e à deterioração de resíduos plásticos descartados no ambiente, evidenciando sua ampla distribuição na vida diária (Conexão com Ciência, 2021).

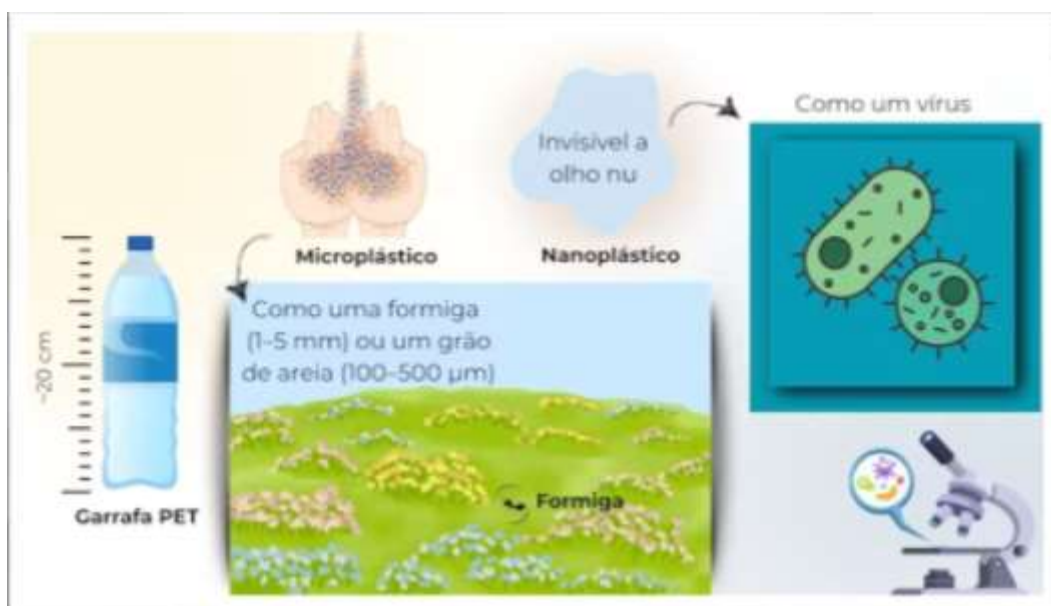
Figura 4: Microplástico, Um Problema Cotidiano



Fonte: Revista Conexão ComCiência, 2021.

A etapa inicial da degradação pode ser desencadeada por fotodegradação, processos físicos, químicos ou biológicos, como mostrado na Figura 4. Todos esses mecanismos envolvem o fornecimento de energia suficiente para quebrar ligações químicas, o que explica por que determinados polímeros apresentam maior suscetibilidade à degradação que outros. Em polímeros ramificados, por exemplo, a presença de ramificações resulta em átomos de carbono terciário na cadeia principal. Como a energia da ligação C–H em carbonos terciários é menor do que em carbonos secundários, a degradação tende a ser iniciada mais facilmente em polímeros ramificados do que em polímeros lineares, compostos majoritariamente por carbonos secundários (Conexão com Ciência, 2021).

Figura 5: Escala Comparativa: Garrafa Pet, Microplásticos e Nanoplásticos



Fonte: Amanda F. Gouveia, G1, 2025

O processo de degradação dos plásticos primários e secundários, conforme imagem na Figura 5, acarretam em diminuição da massa molar do polímero, aumento da molhabilidade e da cristalinidade, além do surgimento de fissuras que originam fragmentos característicos dos MPs. A degradação física das partículas, por sua vez, gera diferentes morfologias de MPs, como fibras, fragmentos e filmes. Já os pellets mantêm sua forma original após a degradação, embora possam apresentar alterações em algumas de suas propriedades.

A exposição às intempéries desencadeia uma série de processos de degradação nos plásticos, incluindo biodegradação por micro-organismos (Conexão com Ciência, 2025), fotodegradação pela radiação solar, degradação térmica devido a variações de temperatura, degradação termo-oxidativa pela oxidação em temperaturas mais baixas e hidrólise pela exposição à água. Esses processos levam à fragmentação dos plásticos em partículas cada vez menores, muitas vezes invisíveis a olho nu (Conexão com Ciência, 2025).

A fragmentação mecânica é causada por movimentos e impactos de ondas, bem como pelo atrito com rochas. Já a fragmentação química, comumente associada à radiação solar, ocorre por meio de processos de fotodegradação e oxidação, impulsionados por espécies reativas presentes no ambiente. As alterações nas propriedades dos polímeros

podem envolver reações intramoleculares e intermoleculares, como despolimerização, oxidação, reticulação ou quebra de ligações químicas (Gabardo; 2019).

4 PROBLEMAS DECORRENTES DOS MICROPLÁSTICOS

Figura 6: A Grande Ilha de Lixo no Oceano Pacífico



Fonte: Olhar Oceanográfico, 2020

Os efeitos da poluição na biodiversidade, além da formação de ilhas de lixo plástico nos oceanos, conforme Figura 6, são inúmeros. De acordo com o relatório divulgado pela Oceana Brasil, mais de 200 espécies marinhas brasileiras já ingeriram plástico. A lista inclui peixes, aves, tartarugas, mamíferos, crustáceos e moluscos. Nos rios amazônicos, pesquisadores encontraram plástico nas brânquias e no intestino de 98% de 14 espécies (AMDA, 2025).

A ingestão de resíduos plásticos pode causar obstruções intestinais, perfurações de órgãos, desnutrição e morte. Em tartarugas-verdes, cada grama de plástico ingerido aumenta em até 450% o risco de definhamento. Entre aves e mamíferos marinhos analisados pelo Projeto de Monitoramento de Praias, 49 das 99 espécies tinham plástico no estômago (Oceana Brasil, 2024).

A principal via de contaminação de corpos hídrico por MPs de fontes primárias é a partir de efluentes domésticos e industriais. Por outro lado, se as partículas plásticas são formadas a partir do intemperismo ambiental, estas são ditas como resultantes de fontes secundárias. Quando plásticos são lançados indevidamente e permanecem no ambiente natural, eles estão sujeitos à ação de diferentes fatores ambientais, como intemperismo, radiação ultravioleta e ação mecânica, que podem promover a fragmentação destes materiais em partículas cada vez menores (Marcelo; Barbara; Tereza; 2022).

O plástico também apresenta riscos de bioacumulação em cadeias alimentares. Espécies também usadas para alimentação dos seres humanos, como o camarão-rosa e a tainha, acumulam partículas plásticas. Isso representa riscos não apenas para a fauna, mas também para a saúde humana.

De modo geral, MPs presentes no ambiente são prontamente ingeridos por diversos organismos, seja de forma direta, seja por transferência trófica. A ingestão desses materiais ocorre desde os níveis tróficos iniciais, como fitoplâncton e zooplâncton, até espécies de maior porte, incluindo aves e tartarugas. A biodisponibilidade dos MP é influenciada por características como tamanho, densidade e coloração. Partículas de menor densidade são preferencialmente ingeridas por organismos da superfície, enquanto partículas mais densas afetam espécies da coluna d'água e do sedimento. Devido à resistência à metabolização, os MPs tendem a bioacumular-se nos organismos e podem ser biomagnificados ao longo da cadeia trófica (Pretorius; 2024).

Os impactos dos MPs à saúde humana ainda estão sendo desvendados pela ciência, mas estudos iniciais já apontam que a presença dessas partículas está associada a estresse oxidativo, problemas cardiovasculares, desregulação endócrina e imunológica, além de comprometimento da memória e do aprendizado. Testes laboratoriais indicam que os MPs podem causar danos e morte de células, induzir a transformação de células saudáveis em cancerígenas e desencadear reações alérgicas. Substâncias químicas presentes nos plásticos, como os ftalatos e o bisfenol, são apontadas como fatores de risco para diversas condições, incluindo distúrbios do comportamento e da memória, e puberdade precoce (FIOCRUZ, 2025).

Figura 7: A presença do Microplástico no Corpo Humano



Fonte: Recicla Sampa, 2023

É uma partícula inerte, que não consegue ser degradada pelas nossas células. Ela fica lá, conforme Figura 7, e não consegue ser eliminada. Ela carrega dentro dela, além do próprio polímero, os aditivos do plástico, que são um capítulo à parte de extrema gravidade. Carrega bactérias que se grudaram nela no caminho e metais pesados. Todos os estudos em animais e estudos mais experimentais mostram que isso suscita um processo inflamatório (Lacerda, 2025).

Testes laboratoriais indicam que os MPs podem causar danos e morte de células, induzir a transformação de células saudáveis em cancerígenas e desencadear reações alérgicas. Substâncias químicas presentes nos plásticos, como os ftalatos e o bisfenol, são apontadas como fatores de risco para diversas condições, incluindo distúrbios do comportamento e da memória, e puberdade precoce (FIOCRUZ, 2025).

5 A FÍSICA COMO VETOR DE COMBATE AO MICROPLÁSTICO

O aumento exponencial da produção e do descarte inadequado de materiais plásticos nas últimas décadas resultou na formação de partículas com dimensões inferiores a 5 mm, atualmente reconhecidas como um dos principais poluentes ambientais em escala global. Devido à sua elevada persistência, ampla dispersão e capacidade de interação com organismos vivos e contaminantes químicos, os MPs representam um desafio científico, tecnológico e ambiental. Nesse contexto, a Física desempenha um papel fundamental na compreensão, detecção e mitigação desse tipo de poluição, fornecendo métodos experimentais, modelos teóricos e bases tecnológicas para a análise do comportamento dessas partículas em diferentes meios (Instituto de Biociência, 2022).

A espectroscopia constitui uma das ferramentas mais relevantes da Física no enfrentamento dos problemas ambientais associados aos MPs, pois permite a identificação, caracterização e quantificação desses contaminantes com elevada precisão e confiabilidade. Técnicas espectroscópicas, como a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e a espectroscopia Raman, baseiam-se na interação da radiação eletromagnética com a matéria, explorando as assinaturas vibracionais características das cadeias poliméricas. Isso possibilita distinguir diferentes tipos de plásticos, mesmo em partículas de dimensões micrométricas, presentes em matrizes ambientais complexas, como água, solo e tecidos biológicos (Costa, 2021).

Uma maneira indireta de se observar os espectros vibracionais, transferindo para a região do visível as informações que seriam normalmente obtidas no infravermelho, é através do espalhamento Raman que consiste no espalhamento inelástico de radiação eletromagnética monocromática que interage com as moléculas. As frequências vibracionais são determinadas pelas diferenças entre as frequências das radiações espalhadas e a da radiação incidente.

A absorção de radiação infravermelha deve ser tanto maior quanto maior for a variação do momento dipolar da molécula durante a vibração. Mediante um tratamento de mecânica quântica, pode ser deduzido que a intensidade integrada de uma banda de absorção no espectro infravermelho é proporcional ao quadrado da derivada do momento dipolar em relação a distância de ligação, nas proximidades da região de equilíbrio. Esta derivada é de difícil acesso, de modo que não se pode prever, teoricamente, a intensidade da banda. Todavia, a experiência tem mostrado que quando o momento

dipolar da ligação é grande, a banda costuma ser de grande intensidade e vice-versa. Assim, pode-se estimar a intensidade das bandas tendo-se em conta a grandeza do momento dipolar, que depende, principalmente, da diferença de eletronegatividade dos átomos envolvidos na ligação.

Uma molécula diatômica pode considerar-se aproximadamente como um oscilador harmônico, cujos átomos efetuam vibrações periódicas com uma frequência e número de onda dados, respectivamente, por:

$$v' = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \quad \text{ou} \quad v = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{\frac{k}{\mu}}, \quad (1)$$

onde:

k é a constante de força de ligação;

μ a massa reduzida da molécula.

Em moléculas heteronucleares, como por exemplo, HF (Fluoreto de Hidrogênio), HCl (Cloro de Hidrogênio) e CO (Monóxido de Carbono), o momento dipolar oscila com a mesma frequência da vibração, por que segundo a eletrodinâmica clássica, podem absorver radiação infravermelha, dando lugar a uma banda fundamental de absorção, cujo número de ondas é dado pela equação 1. Segundo a mecânica clássica, a força é a derivada, com sinal trocado, da energia potencial V em relação à distância r, tendo em conta que a força é:

$$F = -k(r - r_e), \quad (2)$$

que resulta em:

$$V = -\int F dr \quad \therefore \quad V = \frac{1}{2} k(r - r_e)^2 \quad (3)$$

De acordo com os princípios da espectroscopia no infravermelho, a absorção de radiação por uma molécula está diretamente relacionada às suas vibrações internas, sendo tanto mais intensa quanto maior for a variação do momento dipolar durante o movimento vibracional. Sob um tratamento mecânico-quântico, pode-se demonstrar que a intensidade integrada de uma banda de absorção no espectro infravermelho é proporcional ao quadrado da derivada do momento dipolar em relação à distância de ligação, avaliada nas proximidades da posição de equilíbrio molecular. Assim, apenas vibrações que promovem uma variação significativa do momento dipolar são ativas no infravermelho e originam bandas características no espectro. No caso dos MPs, os diferentes polímeros apresentam grupos funcionais específicos cujas vibrações produzem assinaturas espectrais bem definidas, permitindo que, a partir da análise dessas bandas de

absorção, seja possível identificar e diferenciar partículas de MPs com base em sua composição química (Lara L. Zache, 2022).

5.1 Fundamentação física e matemática para aplicação da espectroscopia

5.1.1 Interação radiação-matéria

A caracterização espectroscópica parte da descrição da interação entre um campo eletromagnético e a matéria, modelada pelas equações de Maxwell. Para um campo elétrico harmônico:

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_0 \cos(\omega t) \quad (4)$$

A resposta do material é descrita pelo momento dipolar induzido:

$$\vec{p}(t) = \alpha \vec{E}(t), \quad (5)$$

onde:

- . α é a polarizabilidade molecular, grandeza-chave na espectroscopia Raman;
- . ω é a frequência angular da radiação incidente.

5.1.2 Modos vibracionais e equação do oscilador harmônico

Os átomos em um polímero são modelados, em primeira aproximação, como osciladores harmônicos quânticos. A energia vibracional é dada por:

$$E_v = \hbar \omega_v \left(v + \frac{1}{2} \right), \quad (6)$$

onde:

ω_v é a frequência vibracional do modo normal;

$v = 0, 1, 2, \dots$

Sendo que, essas frequências dependem de:

$$\omega_v = \sqrt{\frac{k}{\mu}}, \quad (7)$$

em que:

k: constante de força da ligação química;

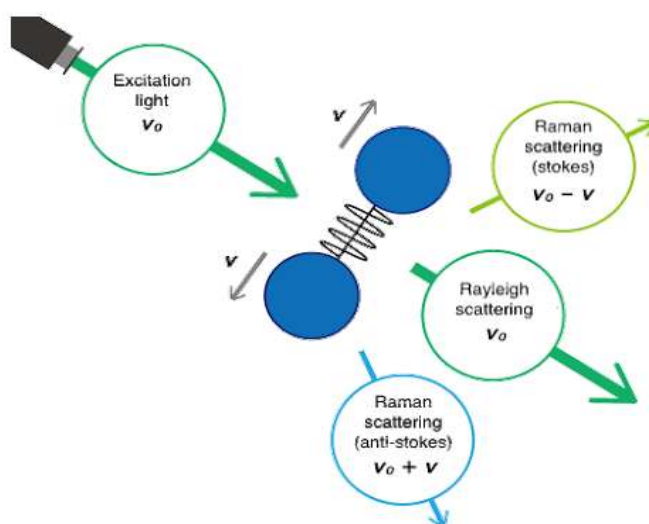
μ : massa reduzida dos átomos.

Com base nos parâmetros, fica claro que cada polímero possui um conjunto próprio de frequências vibracionais, o que gera sua assinatura espectral. Cada tipo de plástico denotará curvas específicas ao receber o feixe de luz.

5.1.3 Espectroscopia Raman - Espalhamento inelástico

A espectroscopia Raman é uma técnica poderosa e complementar ao FTIR, capaz de fornecer informações detalhadas sobre a estrutura molecular dos MPs. Baseada no espalhamento inelástico da luz, a técnica permite obter espectros vibracionais que revelam informações sobre os tipos de ligações químicas e grupos funcionais presentes nos polímeros. A espectroscopia Raman é particularmente eficaz para a identificação de plásticos coloridos e pigmentados, que podem apresentar dificuldades para a identificação com outras técnicas, como o FTIR. O avanço na microscopia Raman permitiu a detecção de partículas de MPs em escalas muito pequenas, até mesmo em nanoescala, possibilitando a identificação de MPs em diferentes amostras ambientais, como água, sedimentos e organismos. No entanto, a técnica pode apresentar limitações como a interferência de fluorescência de alguns pigmentos, a necessidade de amostras limpas e bem preparadas para evitar interferências no sinal (MORAES; OLIVATTO; LOURENÇO; LOURENÇO; TORNISIELO; 2024).

Figura 8: Vibrações Moleculares e espalhamento Raman



Fonte: jasco.com.br

O “efeito Raman”, descoberto pelo físico indiano Sir C.V. Raman (1888-1970), prêmio Nobel em 1930, é uma alteração da cor da luz refletida por moléculas ou estruturas cristalinas, que é imperceptível para o olho nu. No processo de reflexão comum o comprimento de onda da luz não é alterado (espalhamento Rayleigh ou elástico), mas numa fração muito pequena das vezes (10^{-5} a 10^{-9}) ocorre o espalhamento inelástico, isto é, o fóton incidente é afetado pela amostra e é espalhado com outro comprimento de onda.

Na espectroscopia Raman, a polarizabilidade não é constante, mas depende da coordenada vibracional Q :

$$\alpha(Q) = \alpha_0 + \left(\frac{d\alpha}{dQ}\right)_0 Q + \dots \quad (8)$$

Substituindo, $Q = Q_0 \cos(\omega_y t)$, o momento dipolar passa a ter termos do tipo;

$$\vec{p}(t) \propto \cos(\omega t) \cos(\omega_v t), \quad (9)$$

usando identidades trigonométricas, surgem componentes de frequência;

$$\omega_{Raman} = \omega \pm \omega_v, \quad (10)$$

donde, tais termos, correspondem às linhas Raman Stokes e anti-Stokes.

5.1.4 Intensidade Raman

A intensidade do espalhamento Raman é proporcional a:

$$I \propto \left|\frac{d\alpha}{dQ}\right|^2, \quad (11)$$

o que nos leva a concluir que somente modos vibracionais que alteram a polarizabilidade são ativos em Raman.

5.1.5 Espectroscopia FTIR: absorção e lei de Beer–Lambert

A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) é amplamente utilizada na identificação de polímeros, analisando a quantidade de luz refletida, absorvida ou transmitida por uma amostra em uma faixa espectral específica (Costa; J. Silveira; 2021).

Para MPs maiores que 500 μm , recomenda-se o uso de FTIR com um acessório de reflectância total atenuada (FTIR-ATR). Já para partículas menores, o FTIR pode ser acoplado a um microscópio (μ -FTIR), permitindo a análise detalhada de MPs menores, como demonstrado e permite a análise em larga escala de amostras complexas. Estudos revelaram que os polímeros mais comuns em amostras de água doce incluem PE, PP, PS,

PVC, PET e PA, devido à sua alta demanda industrial e baixa densidade, facilitando sua presença em águas superficiais. Apesar de ser altamente precisa, a técnica FTIR enfrenta desafios na análise de partículas muito pequenas e na interferência de substâncias químicas complexas presentes nas amostras ambientais (Couga; Garcia; 2019).

Com o método FTIR, a caracterização dos materiais plásticos está associada à absorção da radiação infravermelha, descrita pela Lei de Beer–Lambert:

$$A(\nu) = \varepsilon(\nu)cl, \tag{12}$$

onde:

A: absorbância;

$\varepsilon(\nu)$: coeficiente de absorção espectral;

c: concentração do material;

l: caminho óptico.

Verifica-se que um modo vibracional é ativo em IR se houver variação do momento dipolar elétrico.

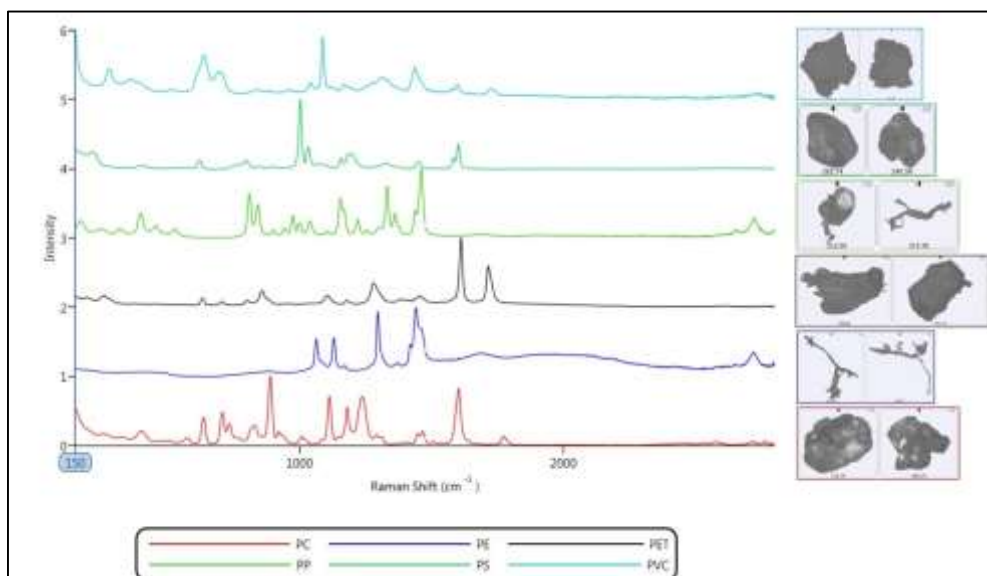
6. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MP POR ESPECTROSCOPIA

A espectroscopia Raman identifica MPs em decorrência de que cada polímero possui uma assinatura vibracional única, associada aos modos de vibração das ligações químicas que compõem sua estrutura molecular. Essa técnica é amplamente utilizada na Física e na ciência dos materiais por ser não destrutiva, altamente específica e adequada à análise de partículas microscópicas.

Quando um feixe de laser monocromático incide sobre uma partícula de MP, a maior parte da luz é espalhada elasticamente (Espalhamento Rayleigh). Contudo, uma pequena fração da radiação sofre espalhamento inelástico, conhecido como efeito Raman, no qual ocorre troca de energia entre os fótons incidentes e os modos vibracionais das moléculas do material. Essa troca resulta em um deslocamento de frequência (deslocamento Raman), característico das ligações químicas presentes no polímero.

Por meio de Espectroscopia Raman Diriga Morfologicamente, imagens automatizadas de partículas com a espectroscopia Raman em uma única plataforma integrada, fornecendo a potência para desbloquear problemas complexos de caracterização de partículas, conforme encontrados em amostras de MP contendo uma mistura de muitos tipos de plástico diferentes. Conforme Figura 8, segundo (PANALYTICAL; 2025).

Figura 9: Caracterização de Microplástico.

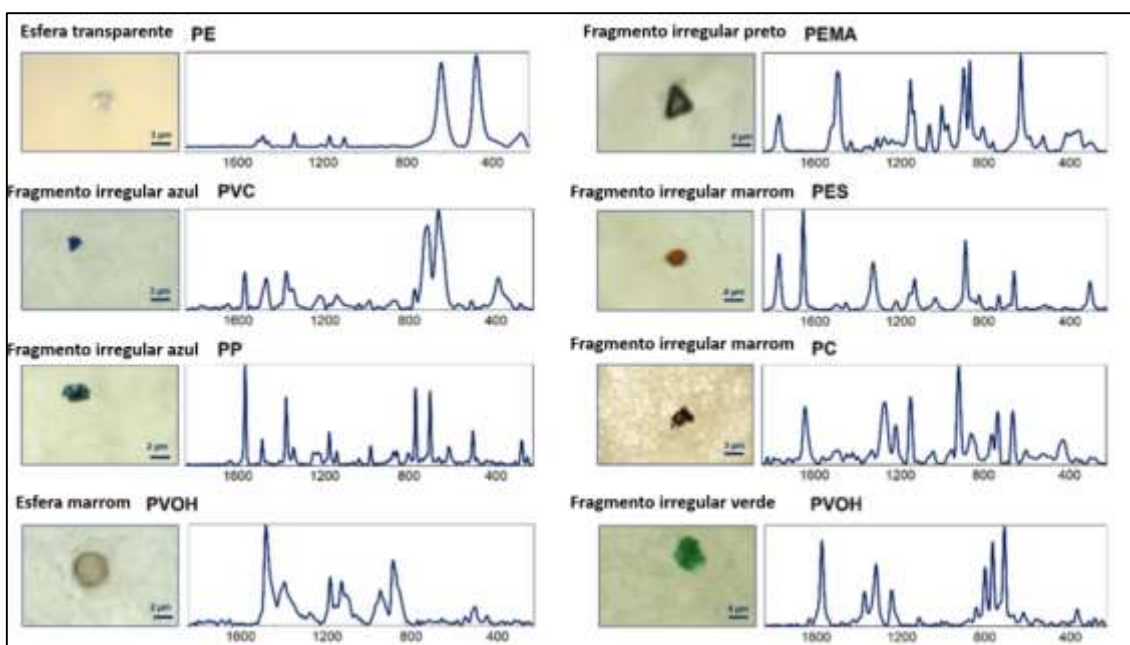


Fonte: Malvern Panalytical, 2020

Entre as principais vantagens da espectroscopia Raman destacam-se a rapidez, a não destrutividade e a elevada especificidade química. Entretanto, a técnica pode apresentar limitações relacionadas à fluorescência de impurezas orgânicas, que pode mascarar o sinal Raman, e ao aquecimento local da amostra devido à incidência do laser. Assim, a espectroscopia Raman identifica MP ao explorar as interações entre luz e matéria, fornecendo informações detalhadas sobre a estrutura molecular dos polímeros. Essa abordagem torna a técnica uma ferramenta fundamental para a detecção, caracterização e monitoramento de MP em estudos ambientais e físicos.

Os pesquisadores do Departamento de Obstetrícia e Ginecologia, do Campus Bio Médico Universidade de Roma juntamente com outros pesquisadores italianos, detectaram MPs no leite materno pela primeira vez, causando uma preocupação com os possíveis impactos à saúde dos bebês. O uso generalizado de plásticos determina a inevitável exposição humana aos seus subprodutos, incluindo os MP, que entram no organismo humano principalmente por ingestão, inalação e contato dérmico. A microespectroscopia Raman identificou as impurezas nas amostras de leite conforme as curvas evidenciadas pela Figura 9 (Baldassin, 2018).

Figura 10: Microplástico Descoberto em Leite Materno.



Fonte: Igui Ecologia, 2018

Com o uso da Espectroscopia, pesquisadores do Departamento de Obstetrícia e Ginecologia, do Campus Bio Médico Universidade de Roma juntamente com outros pesquisadores italianos, detectaram MPs no leite materno humano pela primeira vez, causando uma preocupação com os possíveis impactos à saúde dos bebês.

“Neste estudo único, amostras de leite materno humano coletadas de 34 mulheres foram analisadas por microespectroscopia Raman e, pela primeira vez, a contaminação por MP foi encontrada em 26 das 34 amostras. As micropartículas detectadas foram classificadas de acordo com sua forma, cor, dimensões e composição química. Os MPs mais abundantes foram compostos de polietileno, policloreto de vinila e polipropileno, com tamanhos variando de 2 a 12 μm .” Relata Paula Baldassin, Médica veterinária, formada pela Universidade Paulista, Doutora em Oceanografia Química pelo Laboratório de Química Orgânica Marinha, no Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

7. CONCLUSÃO

A presente pesquisa permitiu compreender, inicialmente, a natureza dos plásticos como materiais poliméricos sintéticos amplamente utilizados pela sociedade moderna em razão de suas propriedades físicas e químicas, como leveza, durabilidade e baixo custo de produção. Entretanto, essas mesmas características favorecem sua persistência no ambiente, uma vez que os plásticos apresentam elevada resistência aos processos naturais de degradação. Como consequência, o descarte inadequado e o uso excessivo desses materiais resultam no acúmulo de resíduos plásticos em diferentes compartimentos ambientais, constituindo um problema de escala global.

No contexto ambiental, os MPs, definidos como partículas plásticas de dimensões inferiores a 5 mm, alcançam oceanos, rios e solos por múltiplas vias, incluindo a fragmentação de resíduos plásticos maiores, o lançamento de efluentes domésticos e industriais, o desgaste de pneus e tecidos sintéticos, bem como o transporte por escoamento superficial e correntes atmosféricas. Uma vez dispersos, esses contaminantes apresentam elevada mobilidade, podendo ser transportados por longas distâncias e incorporados aos ciclos naturais, o que dificulta seu controle e remediação.

Os riscos associados à presença de MPs para a vida humana são motivo de crescente preocupação científica. A ingestão e a inalação dessas partículas podem ocorrer por meio da água potável, dos alimentos e do ar, possibilitando sua interação com tecidos biológicos. Além disso, os MPs podem atuar como vetores de substâncias tóxicas, como metais pesados e compostos orgânicos persistentes, bem como de microrganismos patogênicos, ampliando seus potenciais efeitos adversos à saúde humana, ainda que muitos desses impactos necessitem de investigações mais aprofundadas.

Diante desse cenário, a Física desempenha um papel central na detecção, identificação e caracterização dos MPs, fornecendo bases teóricas e metodológicas para o desenvolvimento de técnicas analíticas precisas. A espectroscopia, em especial, destaca-se como uma das ferramentas mais relevantes, pois permite a identificação da composição química dos polímeros a partir de suas assinaturas espectrais, possibilitando análises qualitativas e quantitativas dessas partículas em diferentes matrizes ambientais.

Nesse contexto, o uso da Transformada de Fourier aplicada à espectroscopia no infravermelho (FTIR), bem como a espectroscopia Raman, constitui um avanço significativo na análise de MPs. Essas técnicas baseiam-se na interação da radiação eletromagnética com as vibrações moleculares, permitindo a obtenção de espectros

característicos associados a diferentes tipos de polímeros. Assim, a aplicação dos fundamentos físico-matemáticos dessas metodologias reforça a importância da Física no enfrentamento da poluição por MPs, contribuindo não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também para o desenvolvimento de estratégias de monitoramento ambiental e de políticas públicas voltadas à mitigação desse problema.

REFERÊNCIAS

- ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS. Microplásticos: um problema complexo e urgente. **Revista Conexão Ciências**, 2021. Disponível em: https://www.abc.org.br/wpcontent/uploads/2025/07/ABC_GTMicroplasticos_Maio2025_ImpressaoMiolo_SandraFrias_versao2_VERSAOFINAL_DIGITAL_COMPLETO.pdf Acesso em: 13 nov. 2025.
- AEMITEQ, Uteq . **Diagnóstico dos Requisitos no Controle de Qualidade:** métodos para quantificação de microplásticos. Portugal, 2020. Disponível em: https://www.aemiteq.pt/wp-content/uploads/2024/03/Diagn%C3%B3stico-nos-Requisitos-de-Controlo-da-Qualidade_uTEQ.pdf Acesso em: 15 dez. 2025.
- ALVES, Nere; OZÓRIO, M. Silva; FILHO, M. P. Souza; JOB, A. Eloizo. Promovendo a conscientização ambiental: resultados de uma pesquisa realizada com alunos do ensino médio sobre polímeros, plásticos e processos de reciclagem. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**. UNIFESP - SP, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/1927/1307> Acesso em: 15 dez. 2025.
- AMDA, Minas, 2025. Blog. **Brasil é o maior poluidor dos oceanos da América Latina**. Disponível em: <https://amda.org.br/noticias/brasil-lidera-poluicao-plastica-na-america-latina/> Acesso em: 11 nov. 2025.
- AZEVEDO, Aline Soares Fonseca de. **Plásticos e microplásticos como tema gerador no ensino de polímeros sob o prisma da sustentabilidade**. 2022. 108 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional - PROFQUI) - Instituto de Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2022. Disponível em: <https://tede.ufrj.br/jspui/handle/jspui/6750> Acesso em: 15 dez. 2025.
- BARCELOS, Viviann. **Jornal o Glogo, G1, 2023. Tartaruga em Meio ao Lixo no Mar de Vitória**. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espirtosanto/noticia/2023/08/02/fotos-tartarugas-em-meio-ao-lixo-no-mar-de-vitoria-chama-a-atencao-pedido-de-socorro.ghtml> Acesso em: 11 nov. 2026.
- BALDASSIN, Paula; **Microplástico em Leite Materno? Sim infelizmente**. IGUI, Ecologia, 2018. Disponível em: <https://www.iguiecolgia.com/microplastico-em-leite-materno-siminfelizmente/> Acessado em: 15 nov. 2026.
- BOEHM, Camila. Agência Brasil, 2018. **Cerca de 80% dos resíduos encontrados nos oceanos tem origem nas cidades**. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-03/cerca-de-80-dos-residuos-encontrados-nos-oceanos-tem-origem-nas-cidades> Acesso em: 12 nov. 2025.
- BONTURI, Roberta; **A Grande Ilha de Lixo no Oceano Pacífico**. Rio de Janeiro, 15 mai. 2020. Disponível em: <https://olharoceanografico.com/a-grande-ilha-de-lixo-no-oceano-pacifico/> Acesso em: 11 dez. 2025.
- BRITO, C. D. A. **Microplásticos na plataforma continental do Ceará :** desembocaduras dos rios Cocó e Ceará . 2018. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do

Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/40499>
Acesso em: 11 dez. 2025.

CAIXETA, D. Soares; CAIXETA, F. César; FILHO, F. C. M. de Menezes. Nano e Microplásticos Nos Ecossistemas: Impactos Ambientais e Efeitos Sobre os Organismos. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer-Goiânia, v.15 n.27; p. 19, 2018. Disponível em: <https://www.conhecer.org.br/enciclop/2018a/biol/nano.pdf> Acesso em: 15 dez. 2025.

CANEVAROLO, Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 3. ed., São Paulo: Artliber, 2013. Disponível em: https://www.artliber.com.br/amostra/ciencia_dos_polimeros.pdf Acesso em: 14 dez. 2025.

CÉSAR, Caio; MALAVOLTA, João; NOGUEIRA, Felipe; ANTÔNIO, Alisson; PATROCÍNIO, Vinícius; 2017. Instituto Humanitas Unisinos. **Projeto Analisa Poluição por microplásticos de praias do litoral paulista**. Disponível em: <https://ihu.unisinos.br/categorias/186-noticias-2017/565114-projeto-analisa-poluicao-por-microplastico-em-praia-do-litoral-paulista> Acesso em: 13 nov. 2025.

COSTA, J. P. C; ARMANDO, C. D; ROCHA-SANTOS, T. Plásticos no ambiente. **Revista Recursos Hídricos**. Vol. 40, N.º 1, 11-18, março de 2019. ISSN 0870-1741.DOI10. Disponível em: https://www.aprh.pt/rh/pdf/v40n1_destaque-1.pdf. Acesso em: 11 dez. 2025.

COSTA, Silveira. **Uso da Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier para identificação, qualificação e caracterização de microplásticos**, 2021. Seminário. Universidade Federal de Pelotas, Centro de Ciências Químicas, Farmacêuticas e de Alimentos. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/ppgq/files/2021/10/6-Julie-Silveira-da-Costa.pdf> Acesso em: 22 nov. 25.

COUGO, C. D. Garcia. **Utilização da Técnica Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) para estimativa das concentrações de carboidratos e de lipídeos em scenedesmus**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/163450/001022019.pdf?sequence=1> Acesso em: 24 nov. 2025.

FAPESP, Pesquisa. **Microplásticos por Todos os Lados**. São Paulo, N° 347, janeiro, 2025. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2025/01/Pesquisa_347.pdf Acesso em: 08 dez. 2025.

FAPESP, Pesquisa. A Ameaça dos Microlásticos. **Revista Pesquisa, FAPESP**, 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-ameaca-dos-microplasticos/> Acesso em 21 nov. 2025.

FIOCRUZ, REPÓRTER SUS, 2025. **O que os microplásticos causam para a saúde humana**. Disponível em: <https://fiocruz.br/noticia/2025/09/reporter-sus-o-que-os-microplasticos-causam-para-saude-humana> Acesso em: 28 nov. 2025.

FRANCHETTI, Martins; MARCONATO, Carlos. Polímeros Biodegradáveis: uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. **Quim. Nova**, v. 29, n.

4, p. 811-816, 2006. Disponível em:

https://quimicanova.s bq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=2458 Acesso em: 16 dez. 2025.

FRONTELMO, Aline Gualberto. **Caracterização do microplástico em um trecho do rio Pomba**, 2022. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Naturais) - Instituto do Noroeste Fluminense de Educação Superior, Universidade Federal Fluminense, Santo Antônio de Pádua, 2022.

FUNCKE, Renata. **Metodologia Para Identificação de Fragmentos Plásticos em Meio Aquoso Através da Microtomografia Computadorizada**, 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em:
https://www.nuclear.ufrj.br/images/Renata_PA%CC%83rissA%CC%83_Nobili_Funck e.pdf Acesso em: 14 dez. 2025.

GABARDO, R. Prussaka. 2019. **Microplásticos**. Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Química, 2019. Disponível em:
<http://www.quimica.ufpr.br/paginas/graduacao/wpcontent/uploads/sites/16/2019/09/sem inario-1-renata-gabardo-microplasticos.pdf> Acesso em: 21 nov. 2025.

GALVÃO, Guto; MAGALHÃES, Danielly. FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. **Plástico e Saúde Global: Um problema atual, pouco abordado e fora de controle**. coordenadoria de comunicação social. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em:
<https://cee.fiocruz.br/plasticos-e-saude-global/> Acesso em: 12 out. 2025.

GEOGRAPHIC, Redação. O que são microplásticos e quais tipos existem. **National Geographic**, São Paulo, v. 25, n. 150, p. 32-45, dez. 2024. Disponível em:
<https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2024/12/o-que-sao-microplasticos-e-quais-tipos-existem> Acessado em: 20 nov.

GUSMÃO, Luís. Impactos De Resíduos De Plástico Na Biodiversidade Aquática. In: CONGRESSO BRAASILEIRO DE COTOXICOLOGIA, 15, 2018, Aracajú. **Anais [...]**. São Paulo: Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo, 2018. p. 36. Disponível em: <https://ecotoxbrasil.org.br/2023/09/12/ecotox-2018-2/> Acesso em: 16 dez. 2025.

ITAIPU, Binacional. **Investigação da presença dos microplásticos em água superficial**. Universidade Federal da Integração Latino-americana, 2023. Convênio. Disponível em: https://documentos.unila.edu.br/sites/default/files/55-2023_cv_4500073227_micro_iv.pdf Acesso em: 14 nov. 2025.

JASCO, Global. **Princípios de Espectroscopia Raman**. Indaiatuba – SP, 2025. Disponível em: <https://jasco.com.br/principios-de-espectroscopia-raman-1/> Acesso em: 16 jan. 2026.

LACERDA, Nara. **Reporter SUS: o que os microplásticos causam para a saúde humana**. FIOCRUZ, Ciência e Saúde, 2025. Disponível em:
<https://fiocruz.br/noticia/2025/09/reporter-sus-o-que-os-microplasticos-causam-para-saude-humana> Acesso em: 02 dez. 2025.

LARA, L. Zacher. **Microplásticos de poliamida e desreguladores endócrinos: influência de fatores ambientais e da fotodegradação**, 2022. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Química, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em:

<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/236411/001138609.pdf?sequence=1> Acesso em: 22 nov. 2025.

LUZ, Arruda. **Caracterização de microplásticos em conteúdos de tratos gastrointestinais de peixes do estuário do Rio Tramandaí** – litoral norte do Rio Grande do Sul através de digestão de tecidos biológicos. Monografia. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Imbé/Osório, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/189034/001085682.pdf> Acesso em: 16 dez. 2025.

MARCELO, Pompêo; BARBARA, Rani-Borges; TEREZA, Cistina. **Microplásticos nos Ecossistemas, Impactos e Soluções**. Instituto de Biociência, Universidade de São Paulo, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/BarbaraRaniBorges/publication/363284529_Microplasticos_nos_ecossistemas_impactos_e_solucoes/links/631655b41ddd4470213ab71f/Microplasticos-nos-ecossistemas-impactos-e-solucoes.pdf Acesso em: 12 nov. 2025.

MORAES, N. Gomes; OLIVATTO, G. Peregrina; LOURENÇO, F. Machado; LOURENÇO, A. Laura; TORNISIELO, V. Luiz. Microplásticos em ambientes aquáticos: ocorrência, riscos ambientais, técnicas analíticas, soluções e perspectivas futuras. **Revista Virtual de Química**. Universidade de São Paulo. 2024. Disponível em: <https://rvq.sbq.org.br/pdf/v16n3a11> Acesso em: 19 nov. 2025.

OECD, Global Plastics. **Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. OECD Publishing, Paris, 2022. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/02/global-plastics-outlook_a653d1c9/de747aef-en.pdf Acesso em: 15 nov. 2025.

OCEANA, Braisl. **Fragmentos da destruição**. Impactos do Plástico na Biodiversidade Marinha Brasileira. São Paulo – SP, 2024. Disponível em: https://brasil.oceana.org/wp-content/uploads/sites/23/2024/10/Fragmentos-da-Destruicao_FINAL-FINAL-FINAL_compressed.pdf Acesso em: 28 nov. 2025.

OLIVATTO, G. P. et al. Microplásticos: contaminantes de preocupação global no antropoceno. **Rev. Virtual Quim.** v. 10, n. 6, p. 1968-1989, 2018. Publicado online em 17 de dezembro de 2018. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/2974> Acesso em: 14 nov. 2025.

ONU. **Dia histórico no combate à poluição plástica**: nações se comprometem a desenvolver acordo juridicamente vinculante. Programa para o meio ambiente, Nairóbi, 02 mar. 2022. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/dia-historico-no-combate-poluicao-plastica-nacoes-se> Acesso em: 14 nov. 2025.

PANALYTICAL, Malvern. **Caracterização de Microplásticos**. São Paulo – SP, 2025. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/br/industries/environment/microplastics> Acesso em: 22 dez. 2025.

POMPEO, Marcelo; RANI-BORGES, Barbara; PAIVA, Cristina. **Microplásticos nos ecossistemas: impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, 2022. 2016 p. ISBN 978-65-88234-112. Disponível em: <https://www.gov.br/cnpq/pt-br/assuntos/noticias/cnpq-em-acao/pesquisadores-lancam-livro-sobre-microplasticos-nos-ecossistemas> Acesso em: 20 nov. 2025.

PRETORIUS, Annabé. **Um guia para plásticos**. Livro de Recursos Africano, 2024. Disponível em: <https://sst.org.za/wp-content/uploads/2024/11/SST-African-Resource-Book-Chapter-2-Plastics-from-Raw-Materials-to-End-of-LifePort.pdf> Acesso em: 28 nov. 2025.

RANGEL, Eduarda. Efeitos dos microplásticos no meio ambiente. In: BARBOSA, Milson dos Santos; BRANDÃO, Barbosa, Luma Mirely de Souza; MELLO, Brandão, Roger Goulart. (org.). **Meio ambiente: gestão, preservação e desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: ePublicar, 2023, v. 4, p. 173-188. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1UbKxH3rhDRHrHSED2La9QsuqxYv3wc2J/view> Acesso em: 12 dez. 2025.

RITCHIE, Hannah; SAMBORSKA, Veronika; ROSER, Max. **Nosso Mundo em Dados, poluição plástica**. Blog, 2023. Disponível em: https://ourworldindata.org/plastic-pollution?utm_source=chatgpt.com Acesso em: 20 nov. 2025.

SAMPA, Recicla. Microplásticos em coração humano. **Revista Recicla**, 2023. Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/cientistas-encontram-microplasticos-em-coracao-humano> Acesso em: 17 nov. 2025.

SCHNEIDER, Ingrid. Trabalho de Conclusão de Curso. **Análise Quali-Quantitativa de microplásticos no sedimento arenoso de praias no litoral norte do Rio Grande do Sul**. Projeto de Pesquisa. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. IMBÉ, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/189037/001085484.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 17 dez. 2025.

SILVA, R.; JESUS, A.; DUARTE, M.; SEGALA, W.; FIORE, F.; **Proposição de procedimentos para identificação de microplásticos em águas superficiais** (Estudo de Caso). In: CONGRESSO DA ABES, 32, 2023. Anais: https://abes-dn.org.br/anais eletronicos/32cbesa/730_tema_i.pdf Acesso em: 13 dez. 2025.

SILVA, Jean. Microplástico é detectado no cérebro humano pela primeira vez. **Jornal da USP**, São Paulo, 14 set. 2024. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/microplastico-e-detectado-no-cerebro-humano-pela-primeira-vez/> Acesso em: 08 nov. 2025.

SILVA, Tamyris. **Primeira evidência de ingestão de microplásticos por peixes do estuário do Rio Amazonas**, 2018. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade e Conservação) - Universidade Federal do Pará, Altamira - PA, 2018. Disponível em: https://ppgbc.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Tamyris.pdf Acessado em: 16 dez. 2025.

TECHNOLOGIES, Agilent. **Análise rápida e automatizada de microplásticos usando imagem química por Laser Direto**. 12 de Out. 2020. Disponível em: <https://www.agilent.com/cs/library/applications/application-marine-microplastics-8700-ldir59942421btbrgilent.pdf?srsId=AfmBOoqR0NUn4DRqTcv3Gsq4kUtHZP4HglmIKdfwrDI1RhMg56Mtkwxx> . Acesso em: 23 nov. 2025.

THOMPSON, R. Lost et Sea: Where is all the Plastic. **Revista Science**, 2004. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1094559> Acesso em: 21 nov. 2025.