

Graphical Abstract



Plastics are essential to our lives, but changes are necessary throughout every step of plastic's lifecycle in order to be in harmony with the environment.

PLÁSTICOS: DOS INDISCUTÍVEIS BENEFÍCIOS ÀS INCONTESTÁVEIS QUESTÕES AMBIENTAIS*

**Adriano Antonio dos Anjos Neto, Adriele Ribeiro dos Santos, Alcindo A. Dos Santos
Alexandra Bazito Panariello, André Luís Stefanuto, Daniel Serrano Moço Lampiasi,
Denise Freitas Siqueira Petri, Roberto Vagner Luiz, Rodolfo Lorençatto**

Instituto de Química, Universidade de São Paulo, 05508-000 São Paulo – SP, Brasil

* Resenha resultante da disciplina MPT6013 Tópicos em Tecnologia Química e Bioquímica, 2º semestre / 2020.

Resumo

O plástico, em seu termo mais amplo, é um dos materiais mais versáteis e amplamente difundidos em todos os segmentos da sociedade, incluindo aplicações industriais gerais e específicas, materiais de alta tecnologia e materiais simples como os relacionados a embalagens, utensílios domésticos, tecidos, etc. Apesar dos indiscutíveis benefícios que estes materiais trouxeram, mais recentemente, questões ambientais relacionadas aos seus descartes e resíduos tem despertado grande preocupação com impactos que já são bastante severos. Além dos evidentes e visíveis impactos ambientais do descarte de materiais plásticos, mais recentemente uma outra questão tem agravado as preocupações relacionadas ao tema e correspondem aos “microplásticos” (partículas com diâmetro entre 5 mm e 1 nm), que estão amplamente distribuídos em todos os sistemas ambientais e organismos. Sem pretender esgotar o assunto, nesta Resenha, apresentamos um compilado de informações relacionadas a estes materiais, como formas de geração, distribuição e especialmente seus impactos em sistemas biológicos. Como uma das formas mais viáveis e versáteis de redução dos problemas ambientais relacionados aos plásticos, apresentamos algumas informações relacionadas à reciclagem.

Keywords: plásticos; polímeros; microplásticos; poluentes

PLASTICS: FROM INDISPUTABLE BENEFITS TO UNQUESTIONABLE ENVIRONMENTAL ISSUES

Abstract

Plastic, in its broadest term, is one of the most versatile, widely disseminated materials in all segments of society, including general and specific industrial applications, high-tech materials and simple materials such as those related to packages, household items, fabrics, etc. Despite the indisputable benefits that these materials have brought, more recently, environmental issues related to their disposals and waste have aroused great concern with impacts, which are already quite severe. In addition to the obvious and visible environmental impacts of the disposal of plastic materials, more recently another issue has aggravated the concerns related to the subject and corresponds to "microplastics" (particles with diameter between 5 mm and 1 nm), which are widely distributed in all environmental systems and organisms. Without intending to exhaust the subject, in this Review, we present a compilation related to these materials, such as forms of generation, distribution and especially their impacts on biological systems. As one of the most viable and veritable ways to reduce environmental problems related to plastics, we present some information related to recycling.

INTRODUÇÃO

Podemos começar perguntando, você sabe o que são plásticos? Provavelmente você dirá: Sim, é a embalagem usada em diversos produtos; é o material presente nos carros, brinquedos, muitos objetos de usos pessoal e doméstico, etc. Bem, na verdade, os plásticos são polímeros com propriedades que permitem que sejam aquecidos e moldados repetidamente. A palavra polímero vem do grego e significa, “muitas partes” (“*poli*” = muitos e “*mero*” = parte). Podemos encontrar polímeros na forma de fibras, elastômeros, termoplásticos (podem ser processados ou moldados várias vezes) e termorrígidos (podem ser processados ou moldados uma única vez). Os polímeros orgânicos são leves, moldáveis, versáteis e tem uma excelente relação custo/benefício, permitindo que sejam empregados em uma ampla variedade de segmentos. Estes fatores contribuíram grandemente para o desenvolvimento do setor industrial dos plásticos, a partir do início do século XX.

Uma breve história antes dos microplásticos ...

O primeiro marco da história dos polímeros é a patente de 1869 de John Wesley Hyatt. Em 1863 uma empresa que produzia bolas de bilhar ofereceu o prêmio de US\$ 10.000 para quem desenvolvesse um material que substituísse o marfim, pois o mesmo estava ficando escasso e envolvia o sacrifício de elefantes. Hyatt desenvolveu o celuloide, um material feito de nitrocelulose e canfora. Este material era moldável a quente e depois mantinha a forma, o que possibilitou não só a produção de bolas de bilhar, mas também a de muitos outros objetos.¹ Entretanto, o celuloide tinha dois problemas: a propriedade explosiva da nitrocelulose e a degradação da canfora com o tempo, comprometendo a segurança e durabilidade dos objetos, produzidos dele. Em 1907 Leo Hendrik Baekeland, considerado o “pai da indústria do plástico”, criou a baquelita para substituir a goma laca, que estava escassa. A goma laca é uma secreção liberada pela fêmea do besouro *Kerria lacca*, um inseto encontrado em florestas da Tailândia. A baquelita é resultante da reação entre fenol e formaldeído cuja patente data

de 1909.² As ligações cruzadas entre estes reagentes levam à formação de um termorrígido com excelentes resistências elétrica e térmica, o que possibilitou seu uso em utensílios domésticos (cabo de panela), telefones, rádios, brinquedos, etc, com longa durabilidade. Os objetos expostos nos museus dedicados a Baekeland ainda estão em perfeito estado, mesmo após 100 anos de fabricação.^{3,4}

Apesar do grande desenvolvimento industrial do início do século XX, os cientistas da época ainda não tinham clareza sobre a natureza dos polímeros, pois as teorias conhecidas para moléculas pequenas não se aplicavam bem ao comportamento dos polímeros. Então, em 1920, exatamente há 100 anos atrás, Hermann Staudinger publicou um trabalho explicando a formação dos polímeros através de reações de polimerização, nas quais os monômeros se ligavam quimicamente uns aos outros, formando macromoléculas.⁵ Era a primeira vez que os termos “polimerização” e “macromoléculas” estavam sendo introduzidos no meio acadêmico.⁶ Staudinger sofreu inúmeras críticas, mas resistiu a todas e provou com vários dados experimentais, como medidas de viscosidade, que havia uma nova classe de materiais com alta massa molar e propriedades diferentes das até então conhecidas.

A segunda Guerra Mundial demandava o desenvolvimento de novos materiais para a fabricação de paraquedas, cabos, materiais resistentes à corrosão, etc. No período entre 1920 e 1940, aproximadamente, foram desenvolvidos o acetato de celulose, que não era explosivo como a nitrocelulose, o poliestireno (BASF, Polystyrol[®]), a poliamida (DuPont, Nylon[®]), o polietileno (ICI), o politetrafluoretileno (Chemours, Teflon[®]), entre outros. Para se ter uma ideia, em 1939 a produção mundial de polímeros era de aproximadamente 100×10^6 kg e apenas 6 anos depois, (1945) já havia aumentado para 400×10^6 kg.⁷ Em abril de 1946, alguns meses depois do fim da segunda Guerra Mundial, ocorreu a primeira exposição nacional de plásticos (*First National Plastics Exposition, NPE*) no Grand Central Palace, em Nova Iorque. Foi um sucesso enorme porque as pessoas já usavam os objetos de plásticos no seu cotidiano e perceberam o conforto e facilidade que o plástico proporcionava. Hoje, o setor produtor de polímeros atende às demandas de muitos outros setores, tais como agrícola, aeroespacial,

automotivo, cosmético, alimentício, farmacêutico e médico, têxtil e calçadista, microeletrônico, brinquedos e ainda em atividades como tratamento de águas. Polímeros catiônicos são utilizados em estações de tratamentos de águas para formar flocos que se agregam às impurezas (negativamente carregadas) presentes na água residual, permitindo que sejam removidas por decantação ou flotação. Polímeros são também utilizados na produção de membranas empregadas na purificação de água e ainda na produção de caixas d'água, que antigamente eram feitas de amianto (banido por sua toxicidade crônica).

Como já dissemos, os plásticos são leves, moldáveis, versáteis e apresentam excelente relação custo/benefício. É muito difícil imaginar a vida sem plásticos! Em 2018, a produção mundial de plásticos foi de 360×10^9 kg, sendo as maiores demandas, por polipropileno e polietileno.⁸ Mas o que fazer com os objetos ou materiais plásticos depois de usá-los? O destino dos plásticos após seu uso é um problema global que está afetando vários ecossistemas. A degradação do plástico ou a produção de partículas pequenas de plástico (menores que 5 mm) gera o que denominamos de microplásticos. As sessões seguintes discutem a origem dos microplásticos, seus efeitos em organismos/sistemas vivos, caracterização dos microplásticos por técnicas espectroscópicas, a reciclagem dos plásticos como estratégia para mitigar os problemas ambientais e reflexões sobre a atuação humana na questão dos microplásticos.

Microplásticos: da origem aos impactos e sua determinação por FTIR

O termo microplástico foi cunhado pela primeira vez por Thompson e colaboradores⁹ para descrever o acúmulo de pedaços microscópicos de plástico em sedimentos e na coluna de águas europeias. A partir de então, a literatura abarca diversas tentativas de definir esses fragmentos, mas ainda não há uma definição abrangente, que englobe com precisão toda a complexidade do tema.¹⁰ Entretanto, a definição que foi mais bem aceita e difundida é a do Grupo de Especialistas em Aspectos Científicos da Proteção Ambiental Marinha (GESAMP), na qual os microplásticos são compreendidos como partículas de plástico com diâmetro entre 5 mm de diâmetro e 1 nm.¹¹ Tal definição foi sendo aprimorada e, atualmente, microplásticos

para além do tamanho, podem ser classificados com relação à sua origem, em primários ou secundários. Os microplásticos primários são aqueles intencionalmente confeccionados como partículas de pequeno tamanho para fins industriais, tais como *pellets* (empregados na fabricação de resinas) e esferas (utilizadas como esfoliantes em formulações de cremes cosméticos, como abrasivos em cremes dentais e em materiais de jateamento).¹¹ Já os microplásticos secundários são os fragmentos derivados de qualquer produto de polímero sintético orgânico em uso e/ou os presentes no ambiente, formados por processos bióticos e/ou abióticos que causam a desintegração desse material polimérico.^{11, 12}

No que concerne aos processos abióticos, esses provocam alterações na matriz polimérica por meio de fatores ambientais, tais como radiação ultravioleta, calor, hidrólise, fratura mecânica por abrasão com areia ou devido ao atrito com água turbulenta. Já os processos bióticos de formação dos microplásticos envolvem a degradação do material em células microbianas ou por enzimas excretadas por microrganismos.¹²

Cabe ressaltar que os microplásticos, devido ao seu tamanho, facilidade de formação por diferentes processos e por suas versatilidades de usos, estão presentes nos três compartimentos terrestres com os quais nós, seres humanos, interagimos, a saber: água, solo e atmosfera. Por esse motivo, se faz necessário, cada vez mais, conhecer o efeito dessas partículas no organismo humano e buscar técnicas analíticas para identificá-las e caracterizá-las.

Os microplásticos podem apresentar risco para a saúde humana como poluentes ambientais como são, como produtos de suas degradações e ainda como vetores de transporte de suas degradações. Seus efeitos adversos podem ser de natureza física, relacionados com tamanho da partícula, de suas formas e concentração ou de natureza química, através de substâncias nocivas ou tóxicas, associadas à matriz polimérica do microplástico, (aditivos e/ou matérias primas poliméricas – monômeros ou oligômeros), de natureza química indireta, por substâncias absorvidas do ambiente ou ainda como vetor para patógenos.

As mais prováveis vias de entrada e/ou formação dos microplásticos no organismo humano devem ser por pós ingestão, inalação e por via dérmica. Pela via de inalação, microplásticos presentes na atmosfera são absorvidos pelas células epiteliais dos pulmões. Neste particular também se deve considerar que há evidência da presença de nanoplásticos na atmosfera trazendo um grande campo para estudo.¹⁴ Pela via dérmica, o tamanho de partícula considerado para absorção sistêmica é menor que 100 nm, portanto para a via de permeação cutânea, os nanoplásticos devem ser considerados como os de maior relevância.¹⁵

Outro ponto a ser considerado é a interferência dos microplásticos sobre a microbiota do solo¹⁶, o que constitui um campo para estudo futuro da interferência destes sobre o microbioma humano, atuando como carreadores diretos ou indiretos de substâncias aditivas como por exemplo o bis-(2-propil-heptil) ftalato (DPHP)¹⁷

Tais efeitos negativos constituem um campo interessante para estudos de novas macromoléculas e materiais que tenham como *design* o conceito de funcionalidade como a apresentada pelos plásticos, porém que ao se degradarem tragam interferências mínimas ou positivas/benéficas para o meio ambiente e bioma. Com o que se sabe sobre os microplásticos no ambiente e com todos os organismos vivos relacionados, fica evidente que ainda se carece de métodos de análise mais acurados e padronizados.

Análise de microplásticos usando imageamento químico¹⁸

O procedimento tradicional de análise de microplásticos em águas e solos envolve o uso de separação por densidade, onde os microplásticos são segregados e eventualmente tratados com oxidante forte para remoção de matéria orgânica, não pertencente a matriz polimérica do microplásticos sob investigação. O produto deste processo segue para análise visual, utilizando microscópio de bancada, onde é possível detectar microplásticos com tamanho acima de 100 µm. Desta forma, são inevitáveis as intercorrências de erros de paralaxe no momento da análise, onde comumente são necessárias várias análises de uma mesma amostra para se obter resultados coerentes.

A utilização de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), como ferramenta para detecção e caracterização de microplásticos, trouxe recentemente inúmeras informações antes muito difíceis ou impossíveis de se obter. Procedimentos usando imageamento químico, onde uma área da amostra é observada para diferentes frequências na região do infravermelho, especialmente naquelas características de estiramentos oriundos de ligações químicas presentes em polímeros, permite não só a obtenção da imagem do microplástico (à partir de 10-20 μm) e sua distribuição na amostra, como também sua constituição.

O imageamento químico reportado na literatura como o mais utilizado é com ATR (do inglês *attenuated total reflectance*), onde a amostra, após preparação adequada, é lida diretamente por contato com uma superfície. Os dados obtidos são em geral comparados com bibliotecas espectrais provenientes dos fabricantes de instrumentos de FTIR ou geradas internamente, usando materiais de referência. De uma forma menos assertiva, alguns autores reportam o uso de bandas de absorção teóricas, sem considerar possíveis interferências que podem ocorrer em virtude de composição da amostra. Neste sentido, o mesmo trabalho levanta a importância de se utilizar ferramentas quimiométricas para tratamento dos espectros obtidos, já que é possível observar forte atenuação das bandas de absorção e também distorção do espectro em virtude da matriz da amostra. Conseqüentemente, também se observou a necessidade de criação de um método padrão de análise por imageamento químico, validado por diferentes laboratórios, de forma a tornar coerente a comparação de resultados da análise de microplásticos em diferentes tipos de amostras.

Efeitos bioquímicos dos microplásticos em organismos aquáticos

Como já discutimos anteriormente, os plásticos atingiram um patamar de utilização tão elevado em diversas áreas da atividade econômica, que são considerados indispensáveis para a vida humana como entendida atualmente. Porém, o elevado consumo associado com um descarte não planejado e, conseqüentemente, indiscriminado, torna os ecossistemas terrestres,

onde são gerados, uma vasta fonte de poluição. Lixos plásticos, mesmo que destinados a aterros sanitários em ambientes terrestres, fatalmente encontrarão corpos d'água como destino final em seu ciclo no meio ambiente, majoritariamente o ecossistema marinho.¹⁹

Recentemente, o desconfortável entendimento de que o oceano é o destino final de plásticos vem ganhando um aspecto ainda mais incômodo: diversos estudos evidenciam que um novo ciclo passa a ocorrer com estes resíduos plásticos nos ambientes aquáticos, com impacto direto na biota marinha e toda sua cadeia alimentar.

Microplásticos primários ou secundários entram nos corpos d'água devido à má gestão de resíduos sólidos em ambientes terrestres e, a partir daí uma série de efeitos negativos são desencadeados. Provavelmente você já viu na mídia, redes sociais ou até mesmo em livros didáticos, imagens que chocam ao mostrar tartarugas, leões marinhos e outros animais emaranhados em sacolas plásticas, fibras ou outros materiais que afetam sua locomoção ou até mesmo lhes causam danos cutâneos. Por si só, esses efeitos são maléficos, porém eles não param por aí e são muito piores, podendo afetar os organismos em níveis moleculares – esse aspecto ainda mais sombrio será discutido adiante. Antes de abordarmos estas consequências, é importante entendermos o que acontece com estes microplásticos na coluna d'água assim que despejados nos oceanos – aqui discutiremos majoritariamente o ambiente marinho devido a este ser o destino final de microplásticos, mesmo quando o primeiro corpo d'água afetado é, eventualmente, de ambiente lacustre. Para melhor entendimento, podemos subdividir a coluna d'água oceânica em duas grandes regiões: pelágica e bentônica. Simplificadamente, pode-se entender a zona pelágica como aquela abaixo da zona das marés e que se estende horizontalmente pela coluna d'água; por outro lado, a zona bentônica compreende aquela próxima ao fundo oceânico, habitat de organismos que dependem de substrato físico e sedimentos para sobrevivência.

A profundidade na qual os microplásticos estarão localizados na coluna d'água depende de sua densidade: enquanto microplásticos de baixa densidade são encontrados na superfície ou nas camadas superiores da coluna d'água, aqueles de alta densidade irão imergir e, fatalmente,

serão depositados no leito oceânico – na prática isso significa que os microplásticos irão, invariavelmente, adentrar o habitat de organismos marinhos – esse lixo plástico pode se tornar biodisponível à fauna e é onde os problemas começam e se tornam mais graves.

Diversos fatores afetam a biodisponibilidade de microplásticos em sistemas aquáticos,²⁰ notadamente: tamanho, abundância, coloração e densidade, como discutido anteriormente.

Tamanho: quanto menor o tamanho do microplástico, maior é sua capacidade de ingressar na cadeia alimentar através de níveis tróficos inferiores. *Abundância:* quanto maior a concentração de microplásticos no ambiente, maior a probabilidade de um organismo aquático se deparar com estes contaminantes e, conseqüentemente, ingeri-los. *Coloração:* microplásticos podem apresentar coloração semelhante às presas de animais marinhos, levando a um aumento da probabilidade de ingestão, já que existem diversos organismos conhecidos por serem predadores visuais.

Outro fato importante em relação à microplásticos em ambientes marinhos é que eles não se encontram fixos em uma dada região por toda extensão de tempo até decomposição ou entrada na cadeia alimentar; ao contrário, estes microplásticos integram um ciclo dinâmico e que compreende diversos níveis tróficos e processos químicos, físicos e biológicos.²⁰

Microplásticos, presentes na região pelágica estão suscetíveis à bioincrustação por microrganismos aquáticos, fenômeno que leva ao aumento de densidade deste microplástico incrustado e promove migração da zona pelágica à zona bentônica. Ao atingir o sedimento marinho este microplástico se torna biodisponível aos organismos daquela região. Animais capazes de realizar a ciclagem de sedimentos podem então se alimentar destes microplásticos e também ressuspendê-los na coluna d'água. Organismos com habitat em camadas menos profundas na região pelágica podem ingerir o microplástico devido ao seu padrão de alimentação não-seletiva e excretá-lo em forma de fezes, que fatalmente atingirão regiões mais profundas ou serão ingeridos por outros organismos, já que passar pelo sistema digestivo de um animal torna esse contaminante mais palatável para outros organismos devido à abundância de microrganismos aos quais o microplástico é exposto durante o processo

digestório do primeiro organismo que se alimentou dele. Este ciclo proporciona diversas portas de entrada de microplásticos na cadeia alimentar, inclusive com transferência na cadeia alimentar via ingestão de organismos contaminados – e o que acontece a partir deste ponto? É intuitivo imaginar que essa exposição aos microplásticos seja prejudicial ao organismo, mas o que de fato acontece após exposição? Como consequência do crescente interesse em estudar estes impactos, diversos efeitos negativos – físicos, bioquímicos e biológicos – já foram observados e reportados na literatura científica. Alguns destes efeitos serão apresentados na sequência – esses efeitos não são, necessariamente, observados em todos os organismos expostos, já que a resposta varia de espécie para a espécie.

Efeitos físicos

Como já comentamos, microplásticos entram nos organismos principalmente através de tecidos respiratórios e sistema gastrointestinal. Emanhamento causado por plásticos pode causar depressão de mobilidade e dano dérmico – obstrução de sistema respiratório e digestório também são efeitos potencialmente observáveis em organismos em contato com estes contaminantes. Pelo fato de os organismos não possuírem enzimas capazes de metabolizarem microplásticos, estes possuem valor nutricional nulo, ao mesmo tempo que causam sensação de saciedade aos animais, ocasionando severa depressão energética e, em consequência, morte por inanição, a depender da concentração.

Efeitos sistêmicos

Há evidência científica de translocação de microplásticos do sistema digestivo para o sistema circulatório de animais aquáticos,²¹ o que na prática permite a estes microplásticos migrarem pelos organismos.

De início, há evidências de ativação da resposta imune, observadas pela existência de granulocitomas^{20,21} em organismos expostos a microplásticos. Entende-se que ao detectar este contaminante no organismo, as defesas não relacionadas à memória imune são ativadas através de mecanismo de fagocitose, que pode culminar em reação inflamatória.

Efeitos moleculares^{20,21}

Uma vez ocorrida a translocação, uma série de efeitos moleculares podem acometer o organismo, em resposta à entrada de contaminantes exógenos nas células:

Downregulation de transcritos é reportada na literatura com efeito na estabilidade homeostática celular devido aos seguintes fatores: (i) depressão de transporte de esterol, cujos receptores possuem papel na resposta xenobiótica; (ii) depressão de axogênese e diferenciação neural, impactando no sistema neural de algumas espécies; (iii) diminuição de atividade de algumas esterase, como por exemplo a acetilcolinesterase, responsável pelo equilíbrio na transmissão de sinal do sistema nervoso aos músculos através da degradação de acetilcolina, que em altas concentrações pode levar à transmissão excessiva de sinal para os músculos; (iv) impacto negativo no metabolismo celular ao suprimir a rota glicolítica, onde a glicose é convertida em piruvato e ATP, moeda energética de célula; (v) desordem no metabolismo de purinas, que pode levar a defeitos genéticos, uma vez que purinas, em conjunto com pirimidinas, são os blocos construtores de DNA e RNA; (vi) desestabilização de lisossomos, comprometendo mecanismos de defesas intracelulares; (vii) redução da concentração de fosfatase alcalina, indicando supressão do sistema imunológico.

Upregulation de mecanismos de resposta, como por exemplo: (i) mecanismos anti-estresse e JNK (c-Jun N-terminal quinases), quinases envolvidas na proliferação celular e apoptose; (ii) receptores do tipo-NOD, capazes de reconhecer padrões de contaminação molecular patogênica. Na literatura científica há também relatos de espécies apresentando exacerbação de oxidação lipídica, o que leva à geração de substâncias citotóxicas e mutagênicas, culminando em alterações histopatológicas em tecidos com exposição crônica a microplásticos.

A exposição a microplásticos impõe aos organismos afetados um estresse oxidativos,²² que ocorre em três etapas:

1. *Início*: como consequência da elevação da taxa de respiração celular, ocorre elevação brusca de espécies reativas de oxigênio (ERO), moléculas oxidantes com capacidade de oxidar e modificar biomoléculas – em condições normais, essas espécies existem

nos organismos em baixas concentrações, uma vez que são suprimidas pelo aparato celular antioxidante.

2. *Resposta*: quando o aparato antioxidante já existente da célula não consegue extinguir o excesso de ERO, é ativado o mecanismo de transcrição dos segmentos de DNA em RNA, que será traduzido em enzimas e moléculas antioxidantes, atuantes na diminuição da concentração dessas espécies no meio intracelular.
3. *Efeito em biomoléculas*: entre as etapas 1 e 2, quando a homeostase celular é, teoricamente, restabelecida, há um certo período de tempo no qual estes agentes oxidantes atuam em biomoléculas como lipídios, DNA, RNA e proteínas, ocasionando efeitos negativos nos organismos.

Organismos que enfrentam esse estresse oxidativo, imposto pelos microplásticos precisam alocar sua energia em processos para manutenção da vida, desta forma o crescimento e reprodução ficam em segundo plano – isso fica evidente em organismos que, ao serem expostos cronicamente a microplásticos, não se desenvolvem ou tem sua capacidade reprodutiva suprimida, resultado da urgente necessidade de realocação energética celular.

Efeitos na comunidade

Por fim, um impacto ainda pouco discutido é a transferência, por transporte passivo, de microplásticos bioincrustados com microorganismos, especialmente bacterianos, para regiões outrora não alcançadas por estes seres, podendo expor ecossistemas inteiros a novas bactérias, possibilitando ocorrência de desequilíbrio biológico e ampliação de resistência bacteriana como resultado da transferência horizontal de genes (entre não descendentes).

Além dos microplásticos em si, aditivos utilizados na síntese dos plásticos, como por exemplo os ftalatos, também possuem impactos em organismos marinhos, porque atuam como disruptores endócrinos, com impactos negativos mesmo em concentrações nanomolares.

Ao considerar tudo o que foi apresentado, você pode estar se perguntando: mas qual é o impacto para a saúde humana? É um questionamento pertinente, dado que estes microplásticos lançados nos oceanos podem retornar e ser ingeridos pelo ser humano ao

consumir peixes e outros organismos marinhos contaminados ou através da própria água que pode ser utilizada no sistema de abastecimento.

A OMS, em relatório de 2019,²³ discute os riscos de microplásticos em água potável e a consequente ingestão humana, reconhece riscos potenciais em relação aos microplásticos e, principalmente, aos aditivos adicionados durante o processo de manufatura e à formação de biofilmes em corpos aquáticos. Neste relatório a OMS propõe uma série de estudos para melhor compreender as relações entre microplásticos e a saúde humana.

Reciclagem de plásticos

A produção estimada de resinas termoplásticas no mundo é maior que 300 milhões de toneladas. Do total, 26 % são produzidos pela China (líder mundial), seguida pela Europa, com 20 % e o bloco econômico NAFTA (EUA, Canadá e México), com 19 %. O Brasil representa 2,4 % da produção mundial com as resinas dos polímeros PE, PP, PVC, PET e “materiais de engenharia”. Estima-se que 8,9 bilhões de toneladas de plásticos primários (ou virgens) e secundários (produzidos de material reciclável) já foram fabricados desde meados do século passado, quando os plásticos começaram a ser produzidos em escala industrial. Cerca de dois terços desse total, ou 6,3 bilhões de toneladas, viraram lixo, enquanto 2,6 bilhões de toneladas ainda estão em uso.

Um estudo divulgado este ano pela organização não governamental WWF (Fundo Mundial para a Natureza) mostrou que, em razão da má gestão dos resíduos, um terço do lixo plástico produzido anualmente no mundo polui a natureza. Esse estudo da WWF, indicou que o Brasil foi o quarto maior produtor de lixo plástico do mundo em 2016, com 11,3 milhões de toneladas, superado pelos Estados Unidos (70,8 milhões de toneladas), China (54,7 milhões de toneladas) e Índia (19,3 milhões de toneladas).²⁴

No Brasil, a maior parte dos resíduos gerados, 10,3 milhões de toneladas (91% do total), foi coletada pelo serviço de limpeza urbana e, somente 145 mil toneladas (1,3% do total), foram encaminhadas para reciclagem. Este é um dos menores índices do mundo e bem abaixo da média global, de 9%, segundo a ONG WWF, que usou em seu relatório, dados primários do estudo “What a waste 2.0”, do Banco Mundial, lançado em 2018.

Na natureza, os plásticos sintéticos levam um tempo excessivo para se degradar. Por exemplo, as garrafas de água e refrigerantes feitas de PET precisam de até 400 anos para se decomporem. Por isso, não é possível separar os impactos gerados pelo plástico no meio ambiente, da gestão de resíduos.

O poli(tereftalato de etileno), ou, simplesmente PET, é um polímero termoplástico da família dos poliésteres. Embora seja muito conhecido hoje através das garrafas plásticas, o material iniciou sua trajetória na indústria têxtil. A primeira amostra da resina foi desenvolvida pelos ingleses Whinfield e Dickson, em 1941. Após a Segunda Grande Guerra, o desabastecimento afetou também a Indústria têxtil da época, ainda baseada em fibras como algodão, linho, lã, entre outras. Assim, as pesquisas que levaram à produção em larga escala do poliéster começaram logo após a Segunda Grande Guerra nos EUA e Europa e baseavam-se nas aplicações têxteis. A ideia era criar alternativas viáveis para as fibras até então usadas, cujos campos de produção das matérias primas de fontes naturais estavam destruídos pela guerra. O poliéster apresentou-se como um excelente substituto para o algodão, função que cumpre muito bem até hoje, inclusive a partir das garrafas recicladas. O PET continuou a ser desenvolvido e novas aplicações foram surgindo. Sua resistência mecânica foi comprovada quando o poliéster passou a ser utilizado na indústria de pneus, em 1962. As primeiras embalagens de PET surgiram nos Estados Unidos e logo após na Europa no início dos anos 70.

O PET chegou ao Brasil em 1988 e seguiu uma trajetória semelhante ao resto do mundo, sendo utilizado primeiramente na indústria têxtil. Apenas a partir de 1993 passou a ter forte

expressão no mercado de embalagens, notadamente para os refrigerantes. Atualmente o PET está presente nos mais diversos produtos.

O PET é o termoplástico mais reciclado do mundo (em quantidade e em percentual). Nenhum país do tamanho do Brasil tem o mesmo nível de reciclagem. Em 2019 reciclamos 311 mil toneladas, ou seja, 55% do material. O índice médio de reciclagem na Europa está em 43% e em 40% nos EUA. Além destes 55% existem as embalagens com destinação especial (agro e remédios por exemplo) que sofrem tratamento diferenciado e acabam em geral sendo transformadas em resinas (poliésteres insaturados), vernizes, etc.

A reciclagem pode ser mecânica (convencional), química (despolimerização) e energética (produção de energia). Conforme senso realizado em 2019,²⁵ temos as seguintes fontes de matérias-primas para reciclagem: Comerciantes de recicláveis - 68%; Cooperativas - 17%; Coleta seletiva - 6%; Catadores - 3%; Outros - 6%. O PET reciclado é vendido na forma de flocos (57%) ou de grânulos (43%).

A Reciclagem de PET colabora para preservação ambiental, mas não só: a atividade alcança plenamente os três pilares do desenvolvimento sustentável: benefícios sociais, benefícios econômicos e benefícios ambientais. Nenhuma atividade pode ser próspera e perene sem que todas as variáveis que incidem sobre seus resultados sejam contempladas.

A Reciclagem das embalagens de PET pós consumo criou, em menos de 30 anos, todo um setor industrial. Essa indústria baseou-se, desde seu princípio, nas regras determinadas pelo próprio mercado: oferta e procura. Assim, ao criar e desenvolver aplicações para a matéria-prima resultante do processo de reciclagem das garrafas usadas, a Indústria do PET determinou uma forte demanda pela sucata. Os principais destinos para o PET reciclado: 23% garrafas, 22% têxteis, 17% automobilístico (Laminados), 15% químico, 10% fitas de arquear e 13% outros.²⁵

O principal desafio para otimização da reciclagem é aumentar o volume de PET coletado. Isto pode ser alcançado através das seguintes ações:

- Construir grandes centros de triagem para separar os materiais reciclados;
- Aumentar a coleta seletiva;
- Aumentar o número de cooperativas de catadores e
- Seguir promovendo a logística reversa como um compromisso de todos os *stakeholders*.

Reflexões e considerações finais

É unanimidade que o uso de plásticos permitiu o avanço da sociedade a patamares inimagináveis antes deles existirem. Pensar em uma vida sem plásticos já não parece possível e realmente não é, pelo menos não como ela é hoje. Porém, o problema real é o plástico ou a forma com a qual o homem lida com ele?

Não podemos achar normal que a imensa maioria do plástico produzido hoje encontre os corpos aquáticos como destino final após utilização humana. Um conjunto de desafios precisam ser vencidos e estes não serão superados sem um conjunto de ações coordenadas, extensivas e urgentes. Diversas frentes de trabalho precisam ser ativadas a nível municipal, estadual, federal e internacional, com a participação da sociedade civil e setor privado; aqui listam-se algumas destas ações:

Educação: os efeitos positivos dos plásticos são vivenciados por todos mundialmente, porém seus efeitos negativos não chegam ao conhecimento da população com a mesma eficiência, pois muitas das suas consequências maléficas, não são percebidas imediatamente pela sociedade civil. Educar crianças e adolescentes de modo a conscientizar sobre os impactos positivos e negativos dos plásticos precisa ser incluído nos currículos escolares.

Reciclagem: governos devem estruturar, propor e implementar caminhos de fomento para atividade econômica da reciclagem, potencializando seu efeito positivo social, econômico e ambiental.

Do berço ao berço: o setor privado precisa encabeçar ações de logística reversa e retorno de resíduos plásticos para a cadeia produtiva. Terceirizar a gestão destes resíduos para os

municípios só agrava a situação, o que nos leva a um patamar ínfimo de valorização dos resíduos.

Por fim, podemos dizer que seria utópico considerar uma retração induzida da cadeia produtiva de plásticos pois as muitas vantagens que os colocaram na posição que ocupam na sociedade, seriam muito dificilmente encontradas em outros materiais. Contudo, ao mesmo tempo, os problemas ambientais já conhecidos e outros que seguramente serão descobertos, especialmente com os processos de degradação dos plásticos em micro- e nanoplásticos e suas transferências para todos os extratos da vida, nos alertam para desenvolvermos plataformas mais eficientes de gestão de resíduos, passando por questões de educação e de desenvolvimentos científicos/tecnológicos.

REFERÊNCIAS

1. Seymour, R. B.; Kauffman, G. B.; *J. Chem. Educ.* **1992**, *69*, 311.
2. Baekland, L. H. *US pat.* 942699A, **1909**
3. <http://www.bakelitemuseum.de>, acessada em Outubro 2020.
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Bakelite_Museum, acessada em Outubro 2020.
5. Staudinger, H.; *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* **1920**, *53*, 1073–1085.
6. Mülhaupt, R.; *Angew. Chem. Int. Ed.* **2004**, *43*, 1054–1063.
7. Freinkel, S.; *Plastic: A Toxic Love Story*, Houghton Mifflin Harcourt: Boston, 2011.
8. https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf, acessada em Outubro de 2020.
9. Thompson, R. C. et al.; *Science* **2004**, *304*, 838.
10. Shim, W. J. et al. Em *Microplastic Contamination in Aquatic Environments*; Zeng, E. Y., ed.; 1st ed., Elsevier, 2018, cap. 1.
11. Frias, J. P. G. L.; Nash, R.; *Mar. Pollut. Bull.* **2019**, *138*, 145-147.
12. Gewert, B. et al.; *Environ. Sci.: Process. Impacts* **2015**, *17*, 1513-1521.
13. Campanele, C. et al.; *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 1212.

14. Revel, M. et al.; *Cur. Op. Environ. Sci. Health* **2018**, 1:17-23.
15. Sobhai, Z. et al; *Sci. Rep.* **2020**, 10, 4841.
16. Schütze, A. et al.; *Int. J. Hyg. Environ. Health*, **2015**, 218, 559-563.
17. Rilling, M. C. et al.; *Environ Chem.* **2019**, 16, 3–7.
18. Xu, J. et al.; *Trends Anal. Chem.* **2019**, 119, 115629.
19. Cole, M. et al.; *Mar. Pollut. Bull.* **2011**, 62, 2588-2597.
20. Wright, S. L. et al.; *Environ. Pollut.* **2013**, 178, 483-492.
21. Franzellitti, S. et al.; *Environ. Toxicol. Pharmacol.* **2019**, 68, 37-51.
22. Trestrail, C. et al.; *Sci. Total Environ.* **2020**, 734, 138559.
23. https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/microplastics-in-drinking-water, acessada em Outubro de 2020.
24. <https://www.wwf.org.br>, acessado em Setembro 2020
25. <https://www.abipet.org.br>, acessado em Setembro 2020