

Estudo bibliográfico sobre polímeros ambientalmente sustentáveis

Bibliographic study of environmentally sustainable polymers

Ademir José Siman Filho¹; Rafaela Cristina Sanfelice²

¹Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. E-mail: ademirjsfilho@hotmail.com

² Professora do Programa de Mestrado em Inovação Tecnológica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. E-mail: rafaela.sanfelice@uftm.edu.br

RESUMO: A utilização de polímeros apresenta grande interesse industrial devido à vasta aplicabilidade e versatilidade desses materiais perante os diversos outros existentes. Porém, a crescente utilização desses materiais faz aumentar a preocupação com o meio ambiente, pois, se descartados de forma inadequada, trazem muitos prejuízos para o ecossistema, visto que são materiais difíceis de serem degradados e se acumulam nas ruas, lixões, rios e oceanos. Nesse sentido, é crescente o interesse especial para a área de polímeros ecologicamente favoráveis, como os biopolímeros, os polímeros verdes e os polímeros biodegradáveis, que, se destinados de forma correta para o descarte final, apresentam enormes vantagens frente aos polímeros tradicionais, a começar pela degradação mais rápida no meio ambiente. O destino final dos materiais poliméricos tradicionais pode ser a reciclagem ou a incineração, onde a reciclagem merece certo destaque, pois é uma forma mais ecológica de se destinar os materiais poliméricos, para que sejam utilizados durante o máximo tempo possível. No Brasil, a coleta seletiva cresce a cada ano, e com ela, cresce também o índice de materiais reciclados, no entanto, ainda há muito que esclarecer a população sobre os problemas dos resíduos plásticos para adquirir uma maior adesão aos processos de reciclagem, tornando, assim, um meio ambiente mais limpo. O estudo e aplicação de polímeros ecologicamente favoráveis também é crescente, pois esses materiais podem ser biodegradáveis, o que favorece o seu descarte, desde que seja feito de forma adequada. Neste artigo, uma revisão da literatura foi feita com o intuito de debater os tipos de polímeros ambientalmente sustentáveis que já existem e onde eles podem ser aplicados.

Palavras-chave: Polímeros. Biodegradação. Reciclagem.

ABSTRACT: *The use of polymers is of great industrial interest due the wide applicability and versatility of these materials in relation to the various others. However, the increased production of these materials increases the concern for the environment, because if they are discarded in an inadequate way, they cause many damages to the ecosystem, since they are difficult materials to be degraded and accumulate in the streets, dumps, rivers and oceans. In this sense, there is a growing interest in the area of environmentally friendly polymers, such as biopolymers, green polymers and biodegradable polymers, which, if properly destined for final disposal, have enormous advantages over traditional polymers, starting with environmental degradation. The final destination of traditional polymeric materials may be recycling or incineration, where recycling deserves some prominence, as it is a more environmentally friendly way of using polymer materials, so that they can be used for the maximum possible time. In Brazil, the selective collection grows every year, and with it, the index of recycled materials also grows, however, there is still much to clarify the population about the problems of plastic waste to acquire a greater adhesion to the recycling processes, making , thus a cleaner environment. The study and application of environmentally friendly polymers is also increasing as these materials can be biodegradable, which favors their disposal, provided it is done properly.*

Keywords: *Polymers. Biodegradation. Recycling.*

INTRODUÇÃO

Antes da Primeira Guerra Mundial (1914-1918), o contato do ser humano com materiais poliméricos foi somente por acaso, pois ainda não existia o conhecimento da forma e da estrutura dessas moléculas, muito menos do seu alto grau de complexidade. Em 1920, Hermann Staudinger (1881-1965), cientista alemão, propôs a teoria da macromolécula, que foi a primeira tentativa de estudo sobre moléculas de elevada massa molecular. Em reconhecimento a tal feito, Staudinger recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1953. Os polímeros de origem sintética aparecem em relatos somente a partir de 1929, com Wallace H. Carothers (1896 – 1937), químico norte-americano, que formalizou as reações de condensação que originaram as poliamidas e os poliésteres, que posteriormente foram batizados de Nylon.

O crescimento de estudos e fabricação de produtos de polímeros sintéticos deu com a ocorrência da Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Em 1950, o alemão Karl Ziegler (1898-1973) desenvolveu catalisadores organometálicos e estes deram origem aos polímeros estereoregulares, como o polipropileno isotático, descoberto pelo italiano Giulio Natta (1903-1979). Esse tipo de polipropileno representou um enorme avanço na área de polímeros, devido ao fato de ser um plástico sólido com maior poder de aplicação comercial do que aqueles que apresentavam uma forma atática, com viscosidade elevada. Com esse advento, iniciaram-se a busca por materiais estereoespecíficos, definidos por produzirem estruturas químicas de forma controlada, que representam atualmente uma enorme área de interesse em síntese de polímeros (CANEVAROLO, 2002).

Devido à versatilidade de uso, às excelentes condições de durabilidade, à forma simplificada e rentável e à vasta propriedades dos polímeros, houve um enorme interesse na fabricação desses materiais para que atendessem aos diferentes interesses, aumentando a sua produção. Com esse consumo, apareceu o grande vilão ambiental dos tempos modernos. Os descartes plásticos são o grande problema do lixo urbano atual. Sabe-se que esses polímeros apresentam uma enorme resistência à degradação natural, portanto, se acumulam e prejudicam o ciclo de decomposição (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006).

O uso de embalagens plásticas em diferentes áreas, como indústria alimentícia, produtos de limpeza, cosméticos, medicamentos, entre outros, apresenta um aumento significativo com o crescimento da população mundial. Isso porque vive-se em uma sociedade na qual é estimulado a produção e o consumo em larga escala, em que o conceito de rapidez e praticidade muitas vezes ocasiona um excesso de embalagens que predomina em diversos setores do mercado. Os resíduos sólidos produzidos pelo ser humano estão diretamente relacionados aos hábitos de vida de cada cultura e são considerados como um problema social (NASCIMENTO et al., 2007).

Devido a esse aumento desenfreado, os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado desse tipo de material são muitos, pois, além dos plásticos ocuparem um grande volume no lixo, eles acabam interferindo negativamente nos processos de compostagem e estabilização biológica. Além do fato de que, se não forem descartados corretamente, como é o caso dos lixões, encostas e rios, podem afetar diretamente o ecossistema da região, prejudicando a vida de seres vivos que residem nesses locais (NASCIMENTO et al., 2007).

Com esse intuito, o presente trabalho levantou uma revisão detalhada a respeito de polímeros ecologicamente favoráveis baseando-se em artigos nacionais e internacionais publicados a respeito desse assunto para fornecer informações sobre polímeros

tradicionais e polímeros ambientalmente sustentáveis, como os biopolímeros, os polímeros verdes e os polímeros biodegradáveis. Com esse estudo é possível levantar algumas alternativas para a diminuição da poluição causada por materiais de origem plástica. Além disso, o conceito de reciclagem foi abordado como uma ferramenta de grande importância. Também foi abordada uma perspectiva de mercado nacional e internacional desses materiais.

METODOLOGIA

O trabalho foi realizado através da pesquisa detalhada na literatura sobre o assunto de interesse e selecionados artigos nacionais e internacionais encontrados no Google acadêmico e plataformas digitais “Web of science” e “Química nova”. As palavras chaves utilizadas nas buscas dos artigos foram em língua portuguesa e inglesa e foram encontrados resultados significativos para as seguintes palavras no campo “título” da pesquisa: Polímeros Naturais (Natural Polymers), Biopolímeros (Biopolymers), Polímeros Biodegradáveis (Biodegradable polymers) e Polímeros verdes (Green Polymers).

DESENVOLVIMENTO

Polímeros são macromoléculas compostas de grandes cadeias moleculares, formadas por unidades repetitivas de moléculas de baixa massa molecular e que apresentam funcionalidade de no mínimo 2, chamadas de monômeros, que são unidos por ligações covalentes, o que garantem a estabilidade físico-química da extensa cadeia (FLORY, 1953). Como são moléculas de elevada massa molecular, os polímeros apresentam fortes interações intermoleculares que contribuem para as características particulares desse tipo de material. Dentre as principais vantagens dos polímeros em relação aos outros tipos de materiais estão a facilidade de fabricação, a resistência a corrosão, visto que não enferrujam, são isolantes de energia e calor, são transparentes em alguns casos e podem ser recicláveis (MANRICH, 2005).

Quando a funcionalidade do monômero é igual a 2, o polímero tende a possuir uma cadeia linear, pois as ligações acontecem nas extremidades, mas quando a funcionalidade é igual a 3, a tendência é que o polímero apresente ramificações, fatores esses que influenciam nas propriedades, como por exemplo a solubilidade do material (FLORY, 1953). Uma cadeia polimérica pode ser constituída por um único tipo de monômero, a qual recebe o nome de homopolímero ou pode ser formada através da união de unidades monoméricas diferentes, em que recebe o nome de copolímero. Independente de como foi formada a cadeia polimérica, todos os polímeros apresentam uma característica importante que é o elevado valor de massa molecular. Para uma macromolécula ser considerada um polímero, não basta ser formada por unidades repetitivas, ela precisa, também, apresentar um grau de polimerização, ou seja, um número de unidades monoméricas normalmente superior a 10000. Quando as macromoléculas apresentam tamanhos considerados insuficientes para serem chamadas de polímeros, elas recebem o nome de oligômeros (ANDRADE et al., 2001).

Os polímeros podem ser classificados quanto ao seu comportamento mecânico em: plásticos, elastômeros e fibras. Os plásticos são materiais sólidos à temperatura ambiente e podem ser divididos em termoplásticos e termorrígidos ou termofixos. Os materiais termoplásticos são aqueles moldáveis, ou seja, que amolecem com o aumento da temperatura e endurecem com o resfriamento, possuem ainda baixa densidade, são solúveis, resistentes ao impacto e possuem baixo custo, com isso, apresentam uma larga

faixa de aplicações. O processo de fabricação desses plásticos é reversível, pode-se fundir novamente com calor ou dissolução em solventes, possibilitando que esses materiais sejam reciclados.

Os materiais termofixos são caracterizados por não serem remodeláveis, pois uma vez moldados, se aquecidos novamente, os mesmos se decompõem. Esse fato ocorre devido à grande quantidade de ligações cruzadas que se formam na molécula durante o processo de polimerização, diferente dos termoplásticos, que não formam ligações cruzadas. Logo, posteriores mudanças de temperatura e pressão não têm mais influência no processo, tornando-os materiais não-recicláveis e insolúveis. Dessa forma, os termorrígidos são moldados antes da cura, antes que apareçam as ligações cruzadas (MANRICH, 2005).

Os elastômeros são polímeros com grande capacidade elástica que podem deformar mais de duas vezes o comprimento inicial, mas depois de retirado os esforços recuperam rapidamente da deformação, como a borracha vulcanizada, por exemplo. Essa elasticidade ocorre devido à baixa densidade de ligações cruzadas. Por fim, existem também as fibras, que possuem uma orientação forçada da cadeia e dos cristais a fim de serem mecanicamente resistentes para que possam ser utilizados como fios finos.

Os polímeros também podem ser divididos quanto a sua origem. Quando esses materiais são extraídos de fontes naturais, como a celulose, o amido, a quitina, a quitosana, dentre outros, recebem o nome de polímeros naturais. Quando esse material apresenta monômeros com origem em derivados do petróleo e são sintetizados em laboratório, eles recebem o nome de polímeros artificiais ou sintéticos, como o polipropileno (PP), o poli(tereftalato de etileno) (PET), o polietileno (PE) e o poli(cloreto de vinila) (PVC).

PROBLEMAS AMBIENTAIS

Materiais poliméricos apresentam como característica a estabilidade química e microbiológica devido a longa cadeia de hidrocarbonetos. Eles são formados por ligações covalentes, que são ligações fortes e muito difícil de serem rompidas, o que causa dificuldade de degradação por microrganismos. (KLRBAS; KESKIN; GÜNER, 1999; TORIKAI; HASEGAWA, 1999). Muitas vezes, a macromolécula pode ser quebrada em moléculas menores, devido à presença de grupos funcionais que tornam a cadeia polimérica mais suscetível aos ataques de bactérias e fungos, porém, a degradação não é contínua. Outro fator que dificulta a degradação desses materiais por microrganismos é o fato da maioria dos polímeros não apresentarem solubilidade em água, pois sua cadeia é altamente apolar. Essas características são de grande valia quando se deseja produzir um material altamente resistente, porém, acaba se tornando um grande problema quando se observa a quantidade de lixo plástico que vem se formando ao longo dos anos em aterros, rios e mares.

Além do problema com a imensa quantidade de lixo, o plástico também pode acarretar a morte de milhões de seres vivos, espécies marinhas principalmente, visto que é um material muito leve, que pode ser arrastado para qualquer lugar e assim, ingerido pelos animais, que muitas vezes os confundem com o alimento. Os plásticos possuem alto poder de adsorção de poluentes e substâncias tóxicas, logo, quando um animal se alimenta desse material, as toxinas se perpetuam na cadeia alimentar, causando a morte desse animal.

O aumento do consumo de material plástico, que pode chegar a mais de 100 milhões de toneladas por ano (REDDY et al., 2003), aliado com a falta de conscientização da sociedade sobre os perigos do descarte inadequado do lixo plástico agrava os perigos

em relação ao lixo plástico. Em cidades litorâneas, esse material acaba por se alojar nos mares, o que dificulta a sua remoção, e sua decomposição leva mais de 100 anos para acontecer (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006).

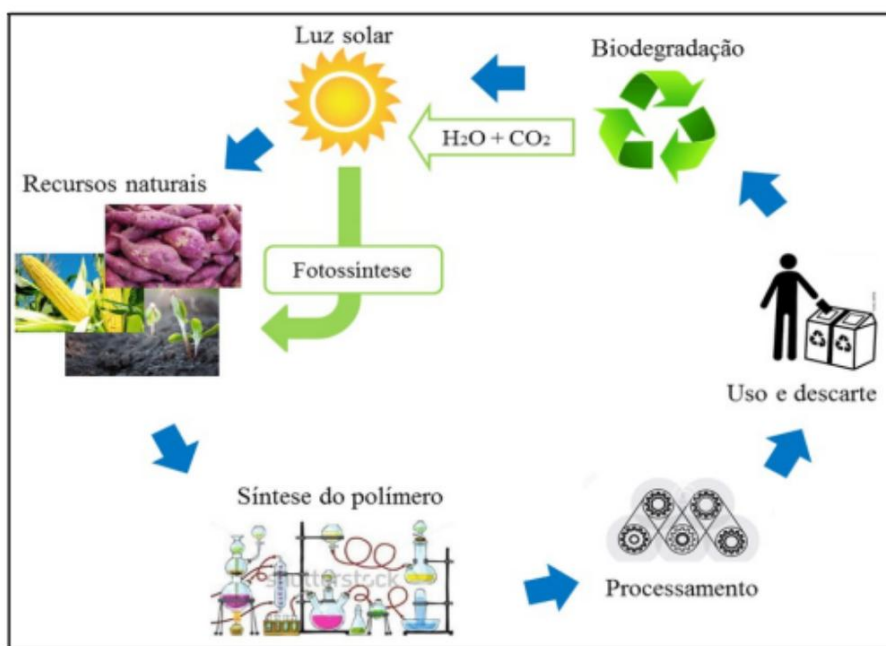
Diante de tantos problemas ambientais, além da preocupação com o lixo que já existe, surge a necessidade da produção de polímeros ambientalmente sustentáveis, como biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes.

POLÍMEROS AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEIS

A ideia de um polímero ambientalmente sustentável vem da necessidade em diminuir o acúmulo de lixo plástico no meio ambiente e também a emissão de gases para a atmosfera a partir da sua degradação. Polímeros de fontes não renováveis, como os derivados do petróleo, quando sofrem degradação por agentes químicos ou biológicos, liberam no meio ambiente quantidades extras de CO e CO₂, e essa liberação causa efeitos, por vezes desastrosos, no ciclo do carbono em nosso planeta (KAMINSKI; RAYNER, 2007; CLARK et al., 2017).

O grande diferencial dos polímeros obtidos ou produzidos através de fontes renováveis é que eles não produzem excesso de gás carbônico para a atmosfera, porque como eles se originaram de seres que realizam fotossíntese, o carbono presente nesses materiais foi proveniente da própria atmosfera e quando for degradado, voltará a ser absorvido pelas plantas. Logo, o balanço do ciclo do carbono (**Figura 1**) é ambientalmente favorável. Dentre os polímeros derivados de fontes naturais, podemos dividi-los em biopolímeros e polímeros verdes. A classe dos polímeros biodegradáveis incluem tanto polímeros derivados de fontes renováveis quanto os de fontes não renováveis, mas sempre possíveis de serem degradados pela ação natural de microrganismos (BRITO et al., 2011).

Figura 1. Balanço do ciclo do carbono presente em polímeros que se originaram de fontes naturais de matéria prima.



Fonte: Brito et al. (2011).

Biopolímeros

Aos polímeros obtidos ou sintetizados por meio de matéria prima oriunda de fontes naturais dá-se o nome de biopolímeros (BRITO et al., 2011). Esses materiais não produzem gás carbônico extra à atmosfera, como explicado anteriormente. Podem ser derivados da cana-de-açúcar, da batata, do milho, entre outras fontes naturais (BRITO et al., 2011). Os biopolímeros, muitas vezes, são chamados de polímeros naturais.

Dentre os biopolímeros conhecidos, destacam-se alguns que podem ser encontrados de forma rotineira em nosso dia a dia, como o amido, a celulose e a quitina. O amido é um polímero natural que se encontra de forma abundante em muitos alimentos, e é o responsável por muitas propriedades de produtos processados (TEIXEIRA et al., 1998). Polímeros a base de amido podem ser utilizados em substituição a polímeros sintéticos principalmente em embalagens, mais especificamente em embalagens de alimentos. Os materiais plásticos comumente usados como embalagens se tornam um grande problema ambiental quando descartado na natureza, pois se nenhum processamento adicional for realizado nesses resíduos, a sua decomposição poderia levar mais de 1000 anos para acontecer (ZALASIEWICZ et al., 2016; GOMEZ; MICHEL, 2013; SHAN et al., 2008; LI; TSE; FOK, 2016).

O amido se destaca nessa aplicação devido a sua vasta disponibilidade, seu baixo custo de extração e sua facilidade de renovação através de novos plantios. Esses fatores permitiram o aumento do número de trabalhos que visam a produção desses materiais como embalagens e o estudo do melhoramento de suas propriedades (MOHAN; DEVCHAND; KANNY, 2017; DE LEIS et al., 2017; MOHAN; KANNY, 2016) pois, em comparação com polímeros como as olefinas, poliéster e nylons, esse material ainda apresenta propriedades mecânicas e térmicas inferiores (IOVINO; ZULLO; RAO, 2008; CURTZWILER; VORST; PALMER, 2008; BERRUEZO; LUDUENA; RODRIGUEZ, 2014; MENDES; PASCHOALIN; CARMONA, 2016).

Outro biopolímero bastante conhecido é a celulose, que é o biopolímero biodegradável mais abundantes que existe disponível na biosfera e é competitivo em relação a outros biopolímeros e também a polímeros convencionais não biodegradáveis, podendo ser extraído de qualquer fonte vegetal, pois é constituinte da parede celular dos mesmos. Este polímero é um polissacarídeo linear formado por moléculas de glicose que se ligam entre si através dos carbonos 1 e 4, originando um polímero linear. A celulose apresenta características de materiais fibrosos e é insolúvel em água e solventes orgânicos comuns. Esse material atrai bastante atenção devido às suas excelentes propriedades física, química e biológica, tais como biocompatibilidade, biodegradabilidade, estabilidade térmica e química, dentre outros. A celulose pode ainda ser utilizada como aditivos em outros materiais poliméricos para conferir maior resistência e elasticidade (REDDY et al., 2018).

A celulose apresenta aplicabilidade bastante distinta em muitas indústrias nacionais e internacionais, destacando-se as indústrias de alimentos, roupas, cosméticos e farmacêutica, além da sua aplicação em indústrias de papel. Este polímero pode também ser empregado na sua forma semissintética, principalmente nas indústrias farmacêutica e de cosméticos, através de seus derivados chamados éteres e ésteres de celulose, que conferem à celulose original diferentes propriedades físico-químicas e mecânicas. Na indústria farmacêutica, esses materiais se destacam em pesquisas que envolvem liberação controlada e prolongada de fármacos e bioadesivos (SHOKRI; ADIBKIA, 2013).

A quitosana é um biopolímero catiônico que tem sua principal forma de obtenção através da desacetilação da quitina, material que pode ser extraído de recursos naturais

renováveis como o exoesqueleto de crustáceos. A quitina passa por um processo de desacetilação e se transforma em quitosana. A cadeia polimérica da quitina é composta principalmente pela unidade repetitiva β -(1-4)-2-acetamido-D-glucose, já a quitosana apresenta pelo menos 60% de grupo p-(1-4)-2-amino-D-glucose, que consiste da desacetilação da quitina (SHIMAZU; MALI; VICTÓRIA, 2007).

A estrutura química da cadeia de quitosana é parecida com a parte fibrosa da celulose e dessa forma, possui propriedades similares. Logo, pode ser empregada também na área de saúde humana e animal, podendo atuar como analgésico e coagulante, por exemplo. Já na área de alimentos, esse polímero pode ser utilizado na fabricação de filmes plásticos para a conservação dos mesmos, sendo mais ambientalmente sustentável do que plásticos feitos a partir de fontes fósseis. A produção de filmes finos utilizando produtos de fonte natural, como a quitosana, como agente bactericida e fungicida, favorece o uso dos mesmos em aplicações em que a biocompatibilidade e biodegradabilidade sejam almejadas. O crescimento considerável da utilização da quitosana em diferentes áreas é devido às suas propriedades antibacterianas e antifúngicas, aliadas a sua biocompatibilidade.

A atividade antibacteriana da quitosana pode ser comprovada na literatura, pois pode eliminar e/ou impedir o crescimento de bactérias como *E. coli* e *S. aureus* (QIN et al., 2017; COSTA et al., 2017; GOY; MORAIS; ASSIS, 2016). A principal hipótese de sua ação contra bactérias envolve o impedimento de trocas gasosas entre o interior e exterior da membrana celular das bactérias alterando a permeabilidade, o rompimento da membrana celular ou a penetração das moléculas de quitosana na célula e, consequente disfunção celular (ELSABEE; ABDU, 2013; SINGH; SHITIZ; SINGH, 2017; WANG; QIAN; DING, 2018).

Os biopolímeros apresentam muitas vantagens ambientais frente a polímeros similares derivados de fontes não renováveis. Porém, apesar dessas vantagens, os biopolímeros, de uma forma geral, não são fáceis de serem extraídos ou produzidos, pois possuem certas limitações no processamento que geram produtos com baixa resistência térmica e muitas vezes com propriedades mecânicas abaixo do desejado. Por isso, muito tem sido estudado a fim de superar as desvantagens desses polímeros para que possam ser aplicados em larga escala. Estudos comprovam que alguns biopolímeros já são capazes de substituir integralmente certos polímeros provenientes de fontes fósseis, como é o caso do polihidroxibutirato – PHB, que é uma alternativa para a substituição do polipropileno (PP), e o polihidroxibutirato-copolihidroxihexanoato – PHBHx que têm grande potencial de substituição completa dos polietilenos de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD) e do PP. Ou seja, é possível produzir o mesmo material com uma matéria prima sustentável, melhorando as condições de degradação no meio ambiente (BRITO, 2011).

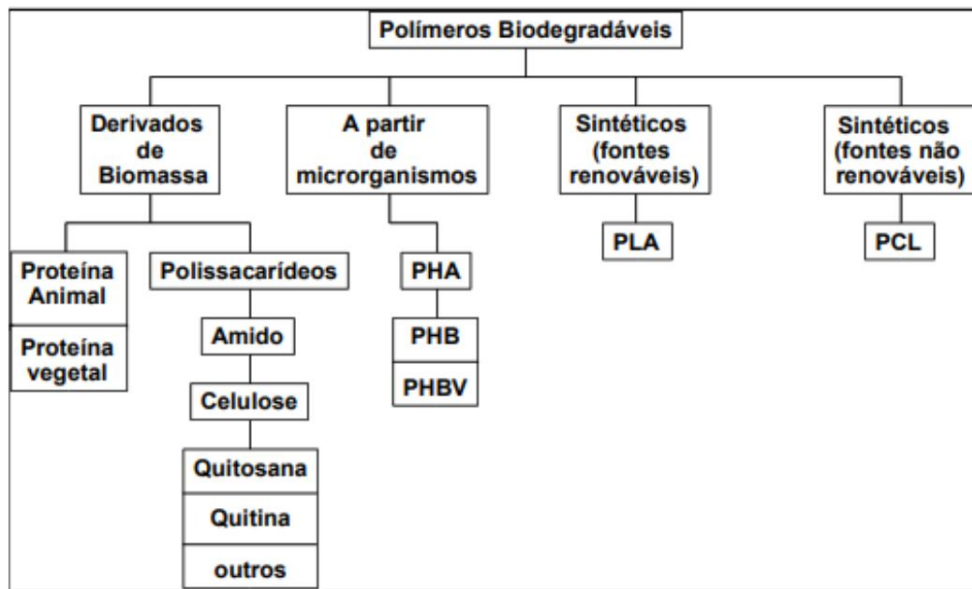
Polímeros Biodegradáveis

Como o próprio nome sugere, essa classe de polímeros engloba todos aqueles que podem ser degradados pela ação de microrganismos vivos e que resultam em biomassa, gás carbônico e água (BRITO, 2011). Essa degradação se torna possível devido à existência de grupos funcionais alifáticos nas cadeias desses polímeros, como ésteres e carbonilas, por exemplo. Os polímeros que pertencem a esse grupo podem ser de origem natural renovável, podem ser sintetizados por meio de bactérias, podem ser de origem animal ou ainda aqueles provenientes de fontes fósseis não renováveis. Um exemplo muito conhecido de polímero biodegradável é a gelatina, que é feita através de proteína animal e possui grandes aplicações industriais, como o revestimento de fármacos e

produção de hidrogel (VILLANOVA; ORÉFICE, 2010).

Hoje em dia é grande o número de polímeros biodegradáveis conhecidos e estudados no cenário mundial. Esses materiais podem ser sintetizados ou formados em ambientes naturais através de ciclos de crescimento de microrganismos (CHANDRA; RUSTGI, 1998), (KUMAR; HAKUR, 2017). Esses materiais podem ser classificados de diferentes formas, como ilustra a **Figura 2**. Essa classificação separa os polímeros biodegradáveis de acordo com seu processo de obtenção. Dessa forma, podemos dividi-los em polímeros de origem agro, que são aqueles provenientes de biomassa de diferentes naturezas, como as proteínas e polissacarídeos, e os polímeros sintéticos, que podem ser sintetizados a partir de fontes renováveis (como a cana-de-açúcar) e a partir de fontes não renováveis (como o petróleo).

Figura 2. Representação simplificada da classificação dos principais polímeros biodegradáveis



Polímeros biodegradáveis também podem ser aplicados em estudos de novos materiais para embalagens, com o mesmo propósito de minimizar os impactos ambientais causados pelo acúmulo de lixo plástico. A grande maioria das embalagens comercialmente conhecidas são fabricadas utilizando polímeros não biodegradáveis, como o polietileno (PE), polipropileno (PP), etileno álcool vinílico, poli (tereftalato de etileno), poliestireno, poliestireno expandido, poliamidas, poliuretano e poli (vinil cloreto), que apresentam excelentes propriedades físicas e mecânicas requeridas para essa aplicação. Esses materiais podem ser reciclados facilmente, porém, muitas vezes eles formam embalagens que apresentam multicamadas em composição com outros materiais, como o alumínio, para conferir uma melhora nas propriedades de barreira física dessa embalagem. Esse fato, associado com possíveis contaminações com o produto embalado limita consideravelmente as possibilidades de reciclagem desses materiais (MUTHURAJ; MISRA; MOHANTY, 2018).

Materiais poliméricos biodegradáveis são fortes candidatos para substituir materiais plásticos em embalagens comuns de alimentos, produtos de higiene e limpeza, pois podem ser degradados facilmente por microrganismos evitando assim possíveis contaminações. Porém, a produção desses materiais ainda apresenta um elevado custo e deficiência em suas propriedades físicas, mecânicas e termomecânicas em comparação

com os materiais poliméricos frequentemente usados, o que torna de grande importância o estudo da otimização das suas propriedades.

Outra empregabilidade muito comum dos polímeros biodegradáveis é na área da medicina, onde podem ser utilizados como fixadores em procedimentos cirúrgicos, como pinos e suturas, substituindo os antigos materiais metálicos. Os mais empregados nesse caso são o poli ácido láctico (PLA) e o poli ácido glicólico (PGA), que são ésteres de cadeia aberta que podem ser degradados pelos fluidos corporais posteriormente de forma gradativa, sem que ocorra prejuízos ao organismo.

O PLA deriva de matérias primas naturais renováveis que contenham açúcar ou amido, como o milho e a beterraba, de onde pode ser extraído o ácido láctico, que poderá ser utilizado como monômero para a síntese do PLA. Esse polímero apresenta boa elasticidade e biocompatibilidade e pode ser usado na interação com os tecidos do corpo humano, é rígido e pode ser moldável. Em condições adequadas de umidade e temperatura, o PLA pode ser degradado em poucos meses. No processo de degradação, primeiramente ocorre a hidrólise das cadeias poliméricas, em que o oxigênio presente nas moléculas de água ataca o carbono da carbonila presente na molécula de PLA. Após a quebra, torna-se possível o ataque de microrganismos vivos que completam a decomposição do material (AGARWAL; KOELLING; CHALMERS, 1998).

Os polímeros biodegradáveis também podem apresentar aplicações como materiais bioadesivos, que são aqueles capazes de se fixarem ao organismo, através das mucosas, da pele ou pela membrana celular. Uma vantagem da utilização desses polímeros frente a materiais comuns, é que eles podem aumentar a eficácia dos medicamentos, uma vez que permanecem mais tempo no organismo devido a essa adesão, contribuindo também para uma menor ingestão diária dos fármacos, além do fato de que podem ser encaminhados para determinados sítios de interesse, ocasionando uma menor toxicidade ao corpo e tornando o medicamento mais eficaz (VILLANOVA; ORÉFICE, 2010).

Polímeros Verdes

Polímeros verdes são aqueles que já eram conhecidos na forma de polímeros convencionais, derivados de fontes de petróleo, porém, agora podem ser sintetizados a partir de fontes renováveis, como a cana-de-açúcar. Nem todos os polímeros verdes podem ser classificados como biodegradáveis, mas podem entrar na classe dos biopolímeros. Um exemplo é o polietileno verde, fabricado a partir da cana-de-açúcar, em que o etanol extraído da mesma substitui àquele que antes era proveniente do petróleo.

Para a produção do polietileno verde, primeiramente ocorre a desidratação do etanol oriundo da cana-de-açúcar, ou de outra fonte renovável. Em seguida ocorre a purificação do produto, o eteno, para a retirada de possíveis contaminantes. A água e alguns componentes oxigenados são gerados como subprodutos e podem ser utilizados em meio agrícola ou mesmo no processo industrial. Assim, pode-se dizer que o polietileno verde apresenta um custo competitivo de mercado, já que a desidratação ocorre em alto rendimento e os subprodutos podem ser reaproveitados, além do fato de que não é necessária uma planta química diferenciada, pois os processos convencionais são úteis e suficientes para a preparação (SCOTT, 2000; BARCZEWSKIA et al., 2018).

De acordo com estudos realizados, para a produção de uma tonelada de polietileno verde, 2,5 toneladas de gás carbônico são retiradas da atmosfera, graças à fotossíntese realizada pelas fontes renováveis. Em contradição a esse processo, para a produção de uma mesma quantidade desse polímero, são liberadas 2,5 toneladas de dióxido de carbono no processo envolvendo matéria prima de fontes não renováveis, como o petróleo. A grande vantagem é que os polímeros verdes podem ser reciclados,

reutilizados ou submetidos ao reaproveitamento energético, uma vez que obteve o gás carbônico da atmosfera, então, a posterior produção desse gás no processo levará a um equilíbrio do carbono, ou pode-se dizer uma emissão neutra (BRITO, 2011).

No entanto, pelo fato de um polímero verde apresentar as mesmas características e propriedades dos polímeros que se originaram de fontes fósseis, o descarte inadequado desse material causa problemas tão grandes quanto os demais. Isso acontece porque nem todos os polímeros verdes são biodegradáveis, e sua degradação leva tanto tempo quanto os materiais convencionais fabricados por fontes não renováveis. Logo, em muitos casos o menor impacto ambiental durante o processo de fabricação, que os caracteriza como sustentáveis, não os tornam resíduos com menor impacto ambiental. Esses materiais podem ser aplicados em diversas áreas, como garrafas PET, embalagens e sacolas (BRITO, 2011).

TRATAMENTO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS

O tratamento adequado dos resíduos poliméricos pode ser feito por alguns métodos ambientalmente corretos, ou menos prejudiciais ao meio ambiente, como a incineração, a reciclagem e a biodegradação.

Incineração

Método utilizado para o destino final de resíduos sólidos, onde material é submetido a elevadas temperaturas e são queimados ao máximo, reduzindo substancialmente o peso e o volume do lixo. Esse método pode ser aproveitado também para a geração de energia, visto que os polímeros apresentam um alto valor energético (longas cadeias carbônicas). Porém, a incineração produz elevada quantidade de substâncias tóxicas, como por exemplo, a emissão de ácido clorídrico pela incineração do PVC, que em meio úmido, volta a terra na forma de chuva ácida. Além do HCl, existem outros componentes como os metais pesados, que também podem ser emitidos pelos incineradores, o que prejudica a atmosfera e podem ocasionar doenças cancerígenas na população ao redor. Dessa forma, esse processo não é o mais eficaz para o tratamento de materiais poliméricos (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006).

Reciclagem

Método extremamente importante no que se refere à sustentabilidade, pois pode-se diminuir substancialmente a quantidade de lixo que é descartado sem fins de reutilização, além da oportunidade de gerar empregos e renda. A reciclagem consiste na alteração das propriedades físicas dos materiais para reutilizá-los na fabricação de novos produtos, mais baratos do que aqueles inicialmente fabricados, mesmo que o processo envolva um mecanismo de separação e limpeza. Isso se dá pelo fato do material já ser pré-preparado, acarretando em gastos menores de energia e matéria prima (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006; LANDIM et al., 2016).

Existem quatro categorias de reciclagem de polímeros. A reciclagem primária ou reutilização ocorre antes que o material saia da indústria, são os recortes e sobras que não foram aproveitados e podem ser reciclados para o mesmo fim, essa reciclagem é feita por processos mecânicos e físicos e retorna produtos de características similares aos que deram origem ao processo. Na reciclagem secundária, o produto que foi destinado à sociedade precisa ser retornado para a indústria para que ocorra a conversão em novos produtos, aqui se encaixam sacolas, embalagens plásticas e demais materiais que já foram utilizados. Porém, nessa etapa de reciclagem, o material produzido não pode ser

encaminhado para fins alimentícios, o mesmo pode ser utilizado na fabricação de sacos de lixo, por exemplo. A reciclagem secundária é a mais utilizada, no entanto só é possível de ser realizada em materiais que apresentam um único modelo de resina plástica. Assim como a reciclagem primária, essa também é feita por processos mecânicos e físicos, não há alteração na estrutura química do polímero.

A reciclagem terciária, denominada também como reciclagem química, é caracterizada pela geração de combustíveis ou insumos químicos a partir do material polimérico a ser reutilizado. Nesse processo ocorre alteração na estrutura química do material polimérico, a partir do método de despolimerização. Por fim, existe a reciclagem quaternária, ou reciclagem energética, processo no qual ocorre uma recuperação de energia dos resíduos poliméricos por incineração controlada. Nesse processo ocorre a degradação total da molécula, produzindo ao final gás carbônico e água.

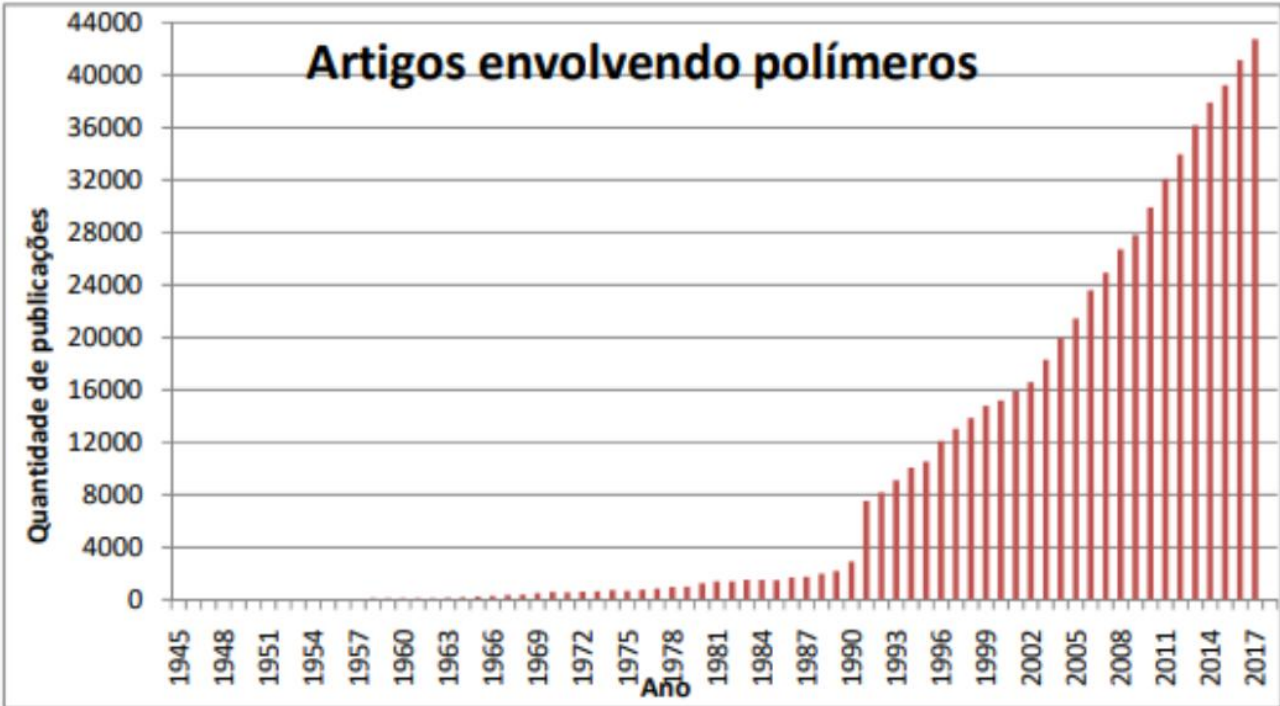
O método de reciclagem a ser realizado depende das condições econômicas e de praticidade do polímero, pois podem existir casos em que a reutilização do material polimérico pode não ser benéfica e lucrativa para a indústria. Entretanto, o processo de reciclagem é considerado a melhor alternativa para a redução de lixo proveniente de materiais poliméricos, evitando que fiquem expostos à difícil e longa decomposição na natureza (LANDIM et al., 2016).

QUANTITATIVO DE PESQUISAS CIENTÍFICAS

Um estudo da quantidade de publicações envolvendo os diversos tipos de polímeros presente no trabalho foi realizado através da plataforma “Web of Science”, a fim de observar sobre o crescimento do assunto e analisar os dados. Para tal, consideramos todas as publicações feitas em periódicos internacionais, não estabelecendo um período de tempo para a análise. Os assuntos foram tratados em inglês, visto que é a língua que maior representa as publicações. Logo, pesquisou-se por “polymer”, “green polymer”, “natural polymer”, “biodegradable polymer” e “biopolymer”.

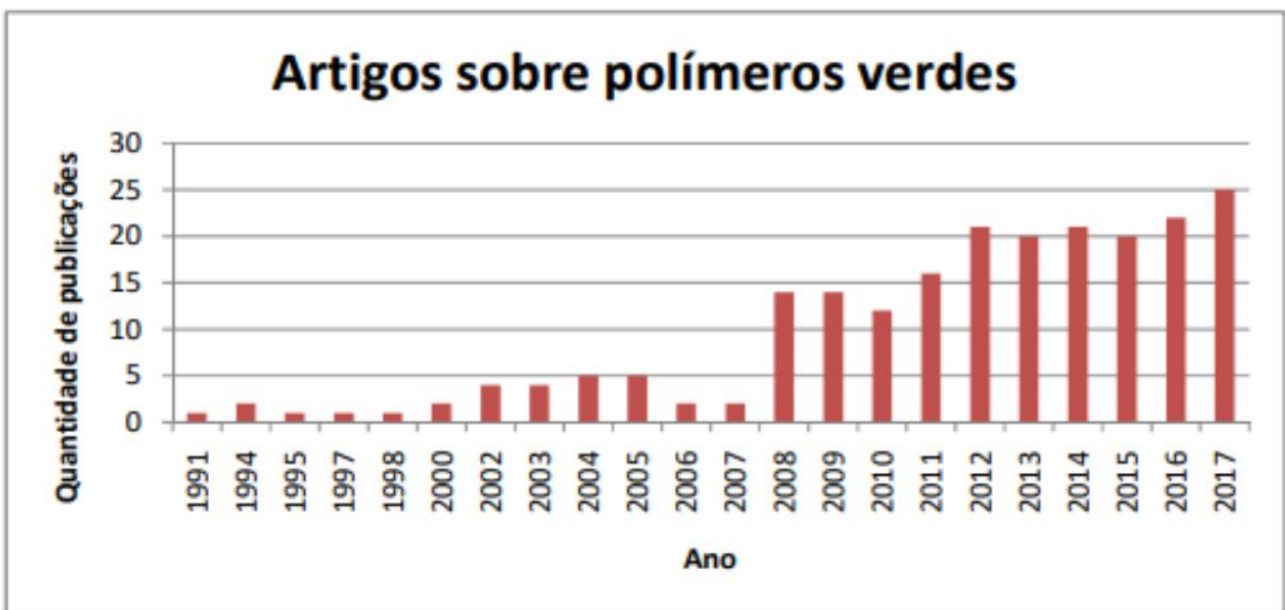
Através de análises da **Figura 3**, observamos que a partir da década de 90, houve um enorme crescimento do número de publicações sobre o tema “polymer”, aumento esse que pode ser relacionado com o crescimento da indústria petroquímica e a consequente utilização das matérias primas provenientes do petróleo para fabricação de polímeros. Até o ano de 1990 havia pouco interesse pela área, com um número *de publicações abaixo de 4 mil artigos*.

Figura 3. Crescimento do número de publicações sobre polímeros, ao longo dos anos, em artigos publicados em periódicos internacionais.



Na **Figura 4**, observamos que a pesquisa utilizando o termo “green polymer” ainda é pouco explorada. O primeiro registro sobre esses materiais se deu na década de 90 e até os dias atuais são poucas as publicações envolvendo polímeros verdes, menos de 30 publicações em artigos internacionais.

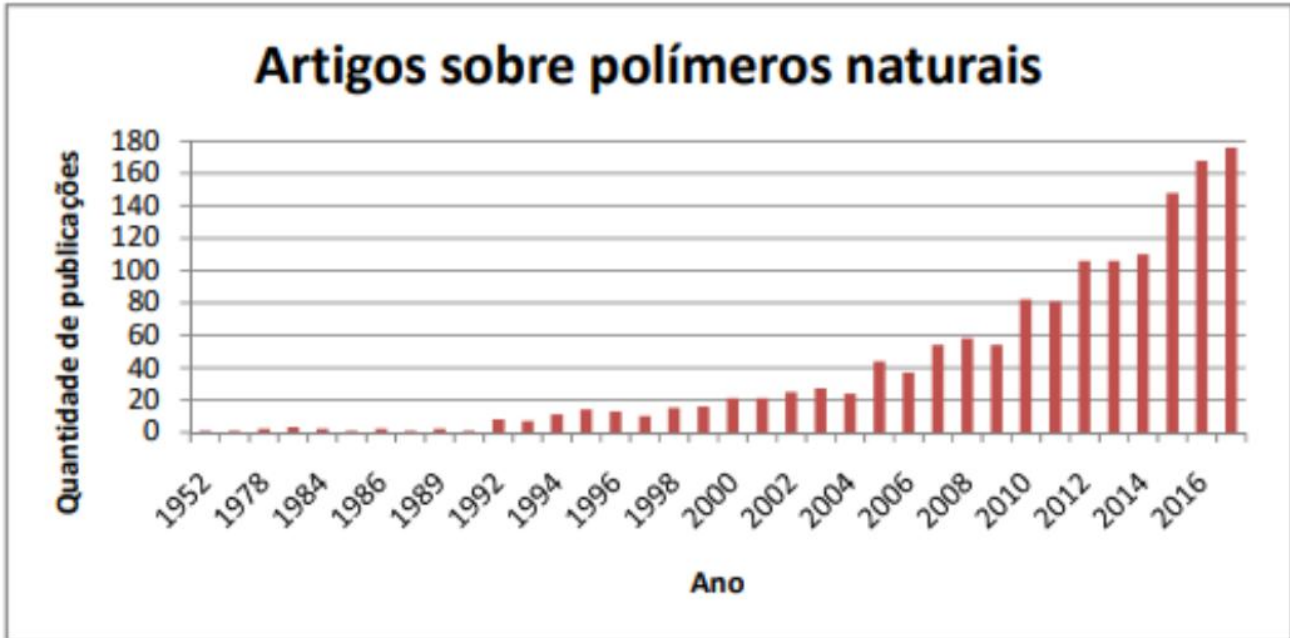
Figura 4. Quantidade de publicações contendo “polímeros verdes” no título, ao longo dos anos, em artigos publicados em periódicos internacionais



Na **Figura 5**, podemos observar que os polímeros naturais começaram a ser

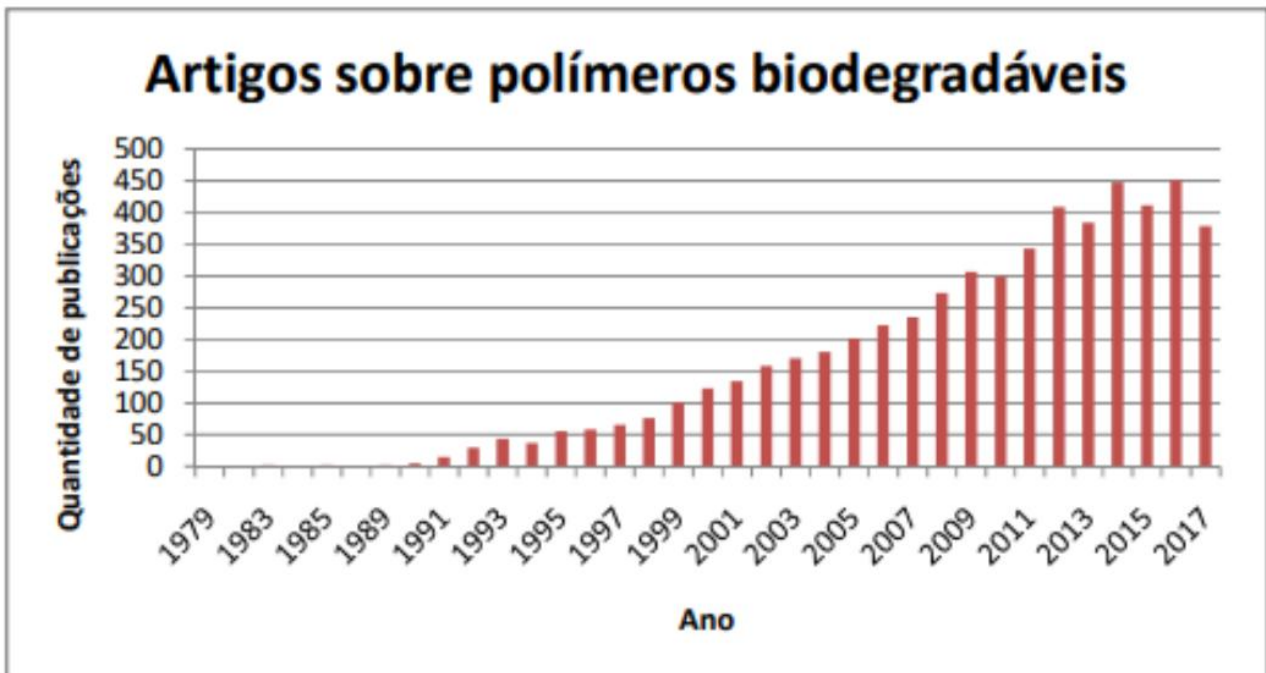
explorados há bastante tempo. O primeiro registro contendo “natural polymer” foi na década de 50, porém, ainda são poucos os estudos na área, totalizando em 2017 menos de 180 publicações em artigos internacionais.

Figura 5. Quantidade de publicações contendo “polímeros naturais” no título, ao longo dos anos, em artigos publicados em periódicos internacionais.



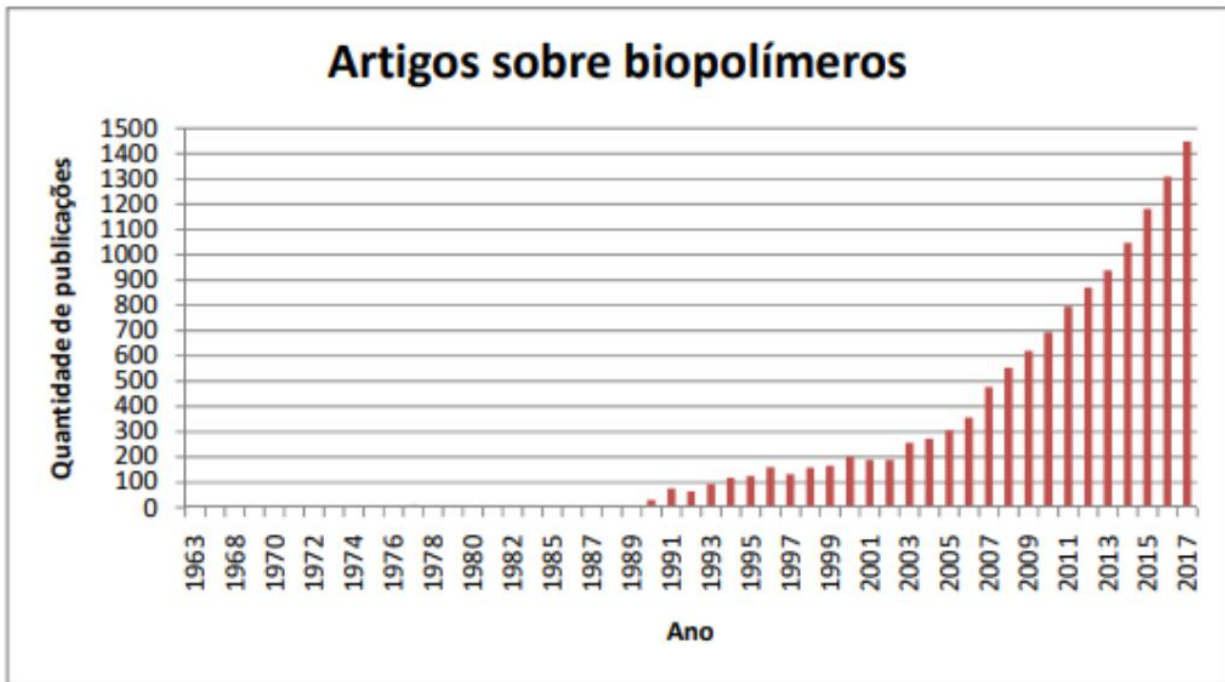
A **Figura 6** retrata a pesquisa realizada através das publicações sobre “biodegradable polymers”. Pode-se afirmar que os polímeros biodegradáveis representam uma área em crescimento, pois desde o início das publicações em artigos, em 1979, até os dias atuais, esse tema já alcançou cerca de 450 publicações em periódicos internacionais.

Figura 6. Crescimento do número de publicações contendo “polímeros biodegradáveis” no título, ao longo dos anos, em artigos publicados em periódicos internacionais.



De acordo com todos os gráficos apresentados anteriormente e observando a **Figura 7**, podemos afirmar que os biopolímeros representam a maior área de publicações dentre os polímeros ambientalmente sustentáveis. A pesquisa realizada utilizando o tema “biopolymers” apresentou mais de 1400 publicações em periódicos internacionais no ano de 2017.

Figura 7. Gráfico do crescimento das publicações contendo “biopolímeros” no título, ao longo dos anos, em artigos publicados em periódicos internacionais.

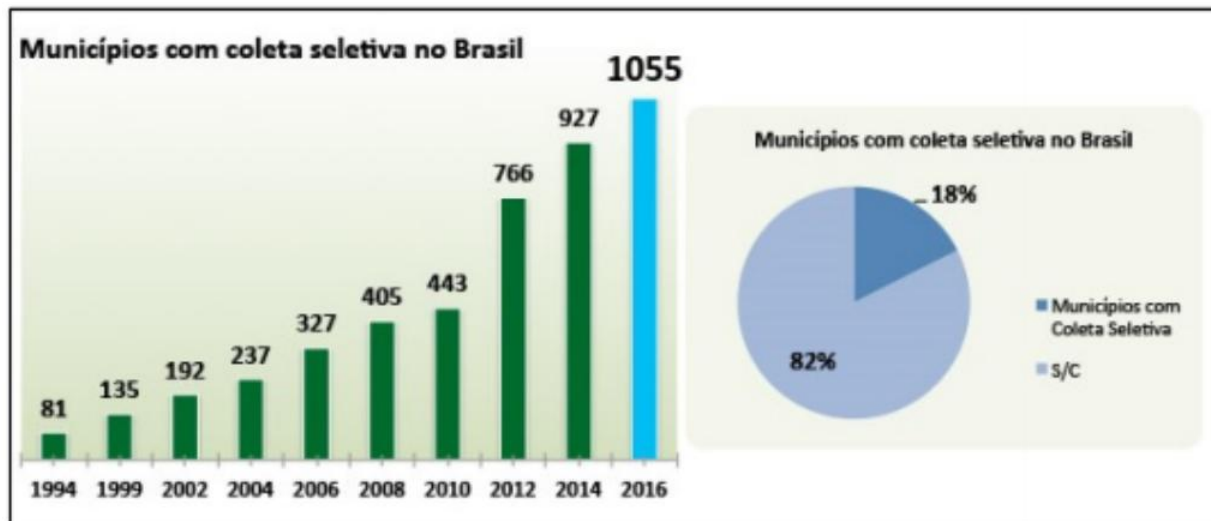


CENÁRIO MUNDIAL SOBRE OS POLÍMEROS

Em 2011, dos 1,3 bilhões de toneladas de material sólido descartado em todo o mundo, os resíduos plásticos representaram cerca de 10% desse montante. Nesse mesmo ano, 572 mil toneladas de polímeros do tipo PET foram consumidos no Brasil. O PET representa a maior parcela da reciclagem de plásticos no Brasil, 57,9% foi reciclado em 2011, propiciando ao Brasil atingir a marca de segundo maior reciclador desse material no mundo. Para efeito de comparação, o Japão foi o primeiro país com 77,9% de índice de reciclagem de PET. A China é o maior produtor de plásticos do mundo, representava em 2015 cerca de 26% de toda a produção mundial, e o Brasil apresentava cerca de 2,4% (DIAS, 2016).

De acordo com dados do Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), o número de municípios que dispõem de coleta seletiva no Brasil vem aumentando a cada ano, porém, ainda representa uma pequena parcela (18%) da quantidade total de cidades brasileiras (**Figura 8**). O aumento se dá certamente ao crescente apelo por um modelo de vida sustentável, mas ainda há muito a fazer para que atingirmos níveis superiores de reciclagem (CEMPRE, 2018).

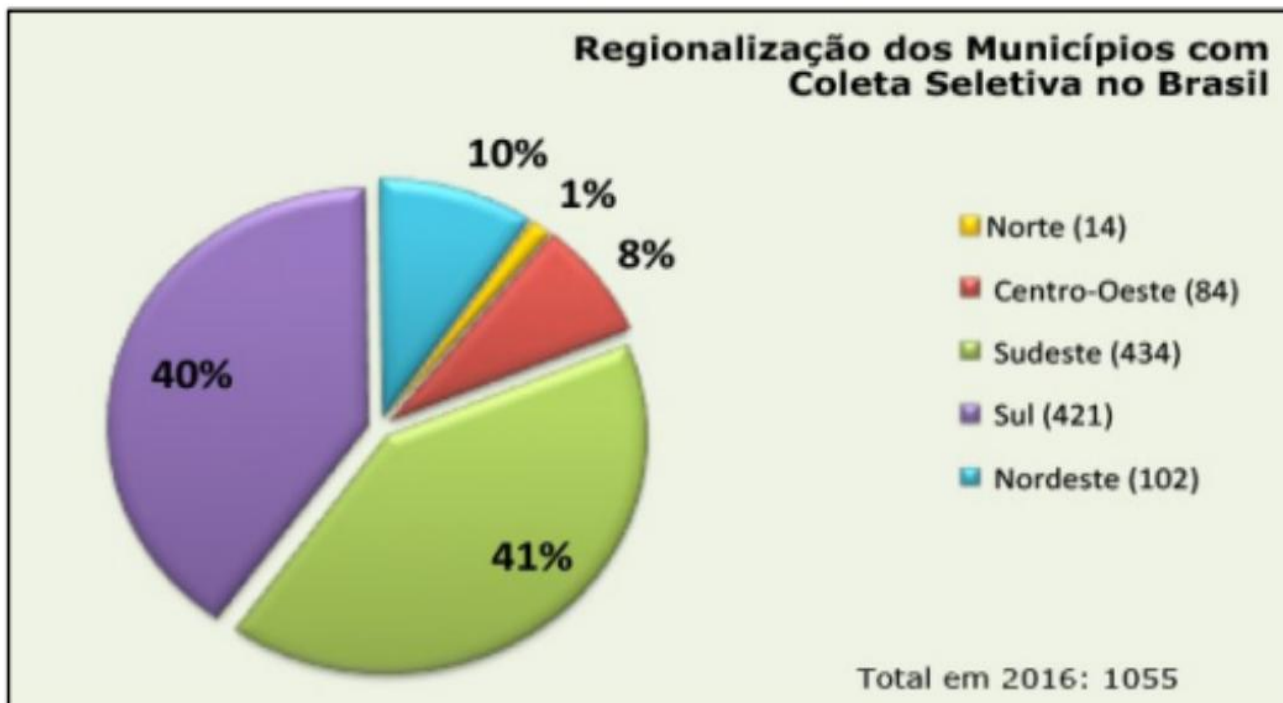
Figura 8. Quantidade de municípios com coleta seletiva no Brasil e representatividade nacional.



Fonte: CEMPRE (2018).

Embora a quantidade de cidades com coleta seletiva tenha aumentado, mais de 1300% desde 1994, isso não ocorre de forma homogênea em todo o país, há uma regionalização desses municípios, que se concentram mais nas regiões sul e sudeste do Brasil (**Figura 9**) (CEMPRE, 2018).

Figura 9. Regionalização dos municípios com coleta seletiva no Brasil.



Fonte: CEMPRE (2018).

Infelizmente, no Brasil, o processo de reciclagem ainda tem muito a ser disseminado e desenvolvido, muitas das vezes, o produto reciclado não representa um retorno financeiro desejado, sendo mais viável a criação de um novo material do que reutilizar aqueles já desgastados. Com exceção do PET, nota-se que o processo de reciclagem

dos plásticos ainda é pouco pronunciada, o que é preocupante, pois, se não forem reaproveitados, esse material acumulará em algum lugar indevido (DIAS, 2016).

No Brasil, muitos municípios destinam seus resíduos sólidos urbanos a lixões e aterros sanitários, o que pode ocasionar a proliferação de animais e transmissão de doenças, além do mau odor que acaba por submeter o lençol freático e o solo a possíveis contaminações. De acordo com dados do CEMPRE, o setor de embalagens representa 1/3 de todo os resíduos sólidos produzidos no Brasil, tornando, portanto, um grande causador do acúmulo de lixo.

CONCLUSÕES

O uso racional e consciente de materiais plásticos se torna indispensável nos dias de hoje, pois esses materiais são os grandes responsáveis pelo aumento desenfreado de lixo em aterros, rios e oceanos, devido a sua estabilidade química, que garantem um elevado tempo de decomposição. Com o intuito de minimizar os impactos ambientais causados na chamada “era do plástico”, muitos estudos têm se concentrado em encontrar alternativas viáveis em processos de reciclagem e na obtenção de materiais plásticos com propriedades menos agressivas ao meio ambiente, como os biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. Porém, a solução completa desse problema também depende de mudanças nos hábitos de consumo de cada cidadão, que pode recusar comprar produtos potencialmente impactantes ao meio ambiente e preferir outros ecologicamente favoráveis. Além de reutilizar, reaproveitar materiais e adotar procedimentos que levem a diminuição de produtos descartáveis, como, por exemplo, a preferência pelo uso de canecas em vez de copos descartáveis. E por fim, fornecer condições adequadas para a biodegradação dos resíduos poliméricos, quando esses forem passíveis para tal método.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, M.; KOELLING, K. W.; CHALMERS, J. J. Characterization of the Degradation of Polylactic Acid Polymer in a Solid Substrate Environment. *Biotechnol. Prog.* v. 14, p. 517–526, 1998.
- ANDRADE, C. T. et al. Dicionário de polímeros. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 2001.
- BARCZEWSKIA, M. et al. Polyethylene green composites modified with post agricultural waste filler: thermomechanical and damping properties. **Composite Interfaces.** v. 25, n. 4, p. 287–299, 2018.
- BERRUEZO M, LUDUENA LN, RODRIGUEZ E. Preparation and characterization of polystyrene/starch blends for packaging applications. **J Plast Film Sheet.** v. 30, n. 2, p. 141–161, 2014.
- BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos.** v. 6.2, p. 127-139, 2011.
- CANEVAROLO JR., S. **Ciência dos polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros.** 2 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2002.
- CLARK, D. A. et al. Reviews and syntheses: Field data to benchmark the carbon cycle models for tropical forests. **Biogeosciences.** v. 14, n. 20, p. 4663-4690, 2017.

- COSTA, E. M. et al. Chitosan as an effective inhibitor of multidrug resistant *Acinetobacter baumannii*. **Carbohydr. Polym.** v. 178, p. 347–351, 2017.
- CURTZWILER G, VORST K, PALMER S. Characterization of current environmentally-friendly films. **J Plast Film Sheet.** v. 24, n. 1, p. 213–226, 2008.
- DE LEIS, C. M. et al. Environmental and energy analysis of biopolymer film based on cassava starch in Brazil. **Journal of Cleaner Production.** v. 143, n. 1, p. 76-89, 2017.
- ELSABEE, M. Z.; ABDOU, E. S. Chitosan based edible films and coatings: A review. **Mater. Sci. Eng. C.** v. 33, p. 1819–1841, 2013.
- FLORY, P. J. **Principle of Polymer Chemistry.** 1 ed. New York: Cornell University Press, 1953.
- FRANCHETTI, S. M. M.; MARCONATO, J. C. Polímeros biodegradáveis – uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. **Química. Nova,** v. 29, n.4, p. 811- 816, 2006.
- GOMEZ, E. F. MICHEL F. C. Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anerobic difestion and long-term soil incubation. **Polym Degrad Stab.** v. 12, n. 12, p. 2583–2591, 2013.
- GOY, R. C., MORAIS, S. T. B.; ASSIS, O. B. G. Evaluation of the antimicrobial activity of chitosan and its quaternized derivative on *E. Coli* and *S. aureus* growth. **Brazilian J. Pharmacogn.** v. 26, p. 122–127, 2016.
- IOVINO R, ZULLO R, RAO MA. Biodegradation of poly(lactic acid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions. **Polym Degrad Stab.** v. 93, n. 1, p. 147– 157, 2008.
- KAMINSKI, T.; RAYNER, P. J. Reviews and syntheses: guiding the evolution of the observing system for the carbon cyclethrough quantitative network design. **Biogeosciences.** v. 14, n. 20, p. 4755- 4766, 2017
- KLRBAS, Z.; KESKIN, N.; GÜNER, A. Biodegradation of Polyvinylchloride (PVC) by White Rot Fungi. **Bull. Environ. Contam. Toxicol.** v. 63, p. 335-342, 1999.
- LANDIM, A. P. M.; et al. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia,** v. 26, p. 82-92, 2016.
- LI, W. C.; TSE H. F.; FOK L. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. **Sci Total Environ.** v. 566–567, n. 1, p. 333–349, 2016.
- MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** 1 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2005.
- MENDES JF, PASCHOALIN RT, CARMONA VB. Biodegradable polymer blends based on corn starch and thermoplastic chitosan processed by extrusion. **Carbohydr Polym.** v. 137, p. 452–458, 2016.
- MOHAN, T.; DEVCHAND, K.; KANNY, K. Barrier and biodegradable properties of corn starch-derived biopolymer film filled with nanoclay fillers. **Journal of Plastic Film & Sheeting.** v. 33, n. 3, p. 309–336, 2017.
- MOHAN, T.; KANNY. K. Thermoforming studies of corn starch-derived biopolymer film filled with nanoclays. **Journal of Plastic Film & Sheeting.** v. 32, n. 2, p. 163–188, 2016.

- MUTHURAJ, R.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: A literature review. **J. APPL. POLYM. SCI.** v. 135, p. 45726 (1-35). 2018.
- NASCIMENTO, R. M. M. et al. Embalagem cartonada longa vida: lixo ou luxo? **Química Nova na Escola.** n.25, p. 3-7, 2007.
- QIN, X. et al. An investigation of the interactions between an E. coli bacterial quorum sensing biosensor and chitosan-based nanocapsules. **Colloids Surfaces B Biointerfaces.** v. 149, p. 358–368, 2017.
- REDDY, C. S. et al. Polyhydroxyalkanoates: an overview. **Bioresour Technol.** v. 87, n. 2, p.137-46, 2003.
- SCOTT, G. 'Green' polymers. **Polymer Degradation and Stability.** v. 68, p. 1-7, 2000.
- SHAN A. A. et al. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. **Biotechnol Adv.** v. 3, n. 3 p. 246–265, 2008.
- SHIMAZU, A. A., MALI, S.; VICTÓRIA, M. V. E. Efeitos plastificante e antiplastificante do glicerol e do sorbitol em filmes biodegradáveis de amido de mandioca. **Semin. Ciências Agrárias,** v. 28, p. 79–88, 2007.
- SHOKRI, J.; ADIBKIA, K. **Application of cellulose and cellulose derivatives in pharmaceutical industries,** in: T.G.M. Van De Ven (Ed.), Cellulose—Medical, Pharmaceutical and Electronic Applications, InTech, Croatia, pp. 47–66, 2013.
- SINGH, R., SHITIZ, K.; SINGH, A. Chitin and chitosan: biopolymers for wound management. **Int. Wound J.** v. 14, p. 1276–1289, 2017.
- TEIXEIRA, M. et al. Ocorrência e Caracterização do Amido Resistente em Amidos de Milho e De Banana. **Ciênc. Tecnol. Aliment.** v. 18, n. 2, p. 246 - 2461998.
- TORIKAI, A.; HASEGAWA, H. Accelerated photodegradation of poly(vinyl chloride). **Polymer Degradation and Stability.** v 63, n. 3, p. 441-445, 1999.
- VILLANOVA, J. C. O.; ORÉFICE, R. L. Aplicações Farmacêuticas de Polímeros. **Polímeros. Ciência e Tecnologia.** v. 20, n. 1, p. 51-64, 2010.
- WANG, H., QIAN, J.; DING, F. Emerging Chitosan-Based Films for Food Packaging Applications. **J. Agric. Food Chem.** v. 17, n. 66(2), p. 395-413, 2018.
- ZALASIEWICZ, J. et al. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Antropocene. **Anthropocene.** v. 13, p. 4–17, 2016.

Recebido em: 21/10/2018

Aprovado em: 21/11/2018