

PANORAMA HISTÓRICO DO USO DE PLÁSTICOS CONVENCIONAIS E BIODEGRADÁVEIS

HISTORICAL OVERVIEW OF THE USE OF CONVENTIONAL AND BIODEGRADABLE PLASTICS

Nicolas de Souza Schaulet, Mestrando, PGDesign - UFRGS

nicolas.schaulet@ufrgs.br

Vinicius Gadis Ribeiro, Doutor, PGDesign - UFRGS

vinicius.gadis@ufrgs.br

Jocelise Jacques de Jacques, Doutora, PGDesign - UFRGS

jocelise.jacques@ufrgs.br

Resumo

Este artigo visa fornecer uma visão de momentos importantes na consolidação do uso de polímeros convencionais e biodegradáveis ao longo da história. Inicialmente discute-se a definição de plásticos convencionais e biodegradáveis, posteriormente faz-se a contextualização histórica dos plásticos derivado de petróleo, aqui referenciados como plásticos convencionais, ressaltando eventos cruciais em sua evolução e posteriormente enfatiza-se os polímeros biodegradáveis. Para isso foi feita uma revisão de literatura com o apoio de um levantamento de dados com publicações que discorrem sobre as tecnologias de polímeros. Os estudos destacam vantagens ambientais dos polímeros biodegradáveis, apesar de custos de produção mais altos. Embora sejam uma alternativa viável aos polímeros derivados do petróleo, há casos em que seu uso é inviável, dependendo do contexto de aplicação, cenário econômico e experiência de consumo.

Palavras-chave: Polímero Biodegradável; Polímero Sintético; Desenvolvimento Sustentável de Produtos, Design e Tecnologia;

Abstract

This article aims to provide an overview of important moments in the consolidation of the use of conventional and biodegradable polymers throughout history. Initially, the definition of conventional and biodegradable plastics is discussed, later the historical contextualization of petroleum-derived plastics, here referred to as conventional plastics, is highlighted, highlighting crucial events in their evolution and later biodegradable polymers are emphasized. To this end, a literature review was carried out with the support of a data survey with publications that discuss polymer technologies. Studies highlight environmental advantages of biodegradable polymers, despite higher production costs. Although they are a viable alternative to petroleum-derived polymers, there are cases in which their use is unfeasible, depending on the application context, economic scenario and consumer experience.

Keywords: Biodegradable Polymer; Synthetic Polymer; Sustainable Development of Products, Design and Technology;

1. Introdução

Os polímeros sintéticos convencionais surgiram como propulsores para o desencadeamento de inovações e o crescimento do desenvolvimento dos mais diversos produtos no século XX, mas a variedade e a disseminação do emprego destes materiais trouxeram prejuízos ao meio ambiente, como o descarte impróprio e superlotação dos aterros sanitários de outros ambientes projetados para sua deposição. Para Brito *et al.* [1], isto ocorre, pelo fato de possuírem elevada resistência à degradação demorando muitos anos para se decompor. Além disto, a degradação de porções muito pequenas destes plásticos, que não são visíveis, se acumula nos ecossistemas em grandes quantidades. Desta forma, pode-se entender que os polímeros sintéticos convencionais são produzidos para aproveitar suas propriedades durante a fase de uso, podendo ser derivados de fontes fósseis ou biológicas [2]. Contudo, ao considerarmos o final do ciclo de vida, observamos a necessidade de polímeros que satisfaçam as condições de biodegradabilidade, biocompatibilidade com degradação de baixa toxicidade, como alternativa aos polímeros sintéticos convencionais existentes [3].

Segundo Mukherjee *et al.* [4] os polímeros podem ser classificados em polímeros biodegradáveis naturais (polissacarídeos e proteínas), sintéticos (ésteres, amidas, éteres, uretanos) e biopolímeros sintéticos (ou sistemas híbridos), a figura 1 apresenta a classificação dos polímeros.

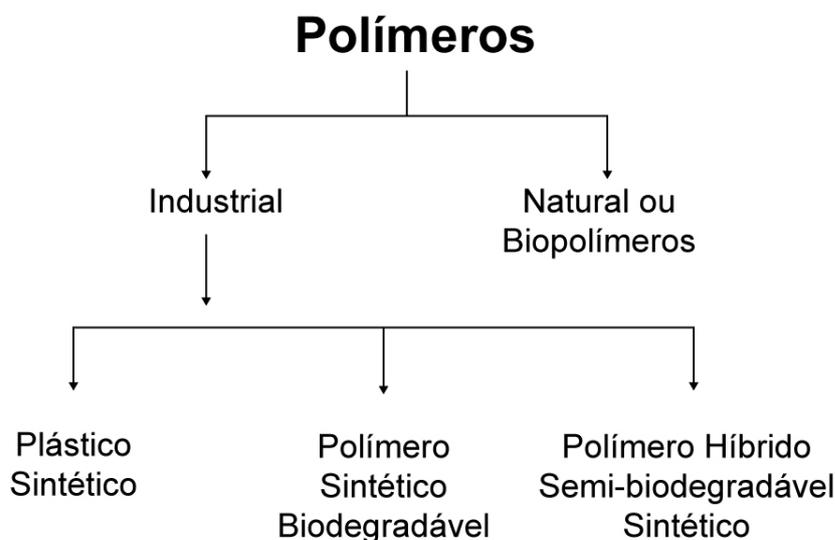


Figura 1: Classificações dos polímeros. Fonte: Adaptado de Mukherjee *et al.* [4]

Cabe salientar aqui, que os plásticos biodegradáveis não estão estritamente ligados a recursos renováveis, pois a biodegradação está mais relacionada à estrutura química do composto do que à sua origem [5]. Os critérios de decomposição no ambiente, precisam ser estabelecidos e divulgados como forma de assegurar, para utilizadores e consumidores finais, a capacidade de biodegradação desses bioprodutos [6]. O enterro no solo é amplamente usado para testar a degradação, mas a reprodução dos resultados é desafiadora devido à falta de controle do clima e dos microrganismos no local do teste [7]. O comprimento da decomposição depende da estrutura, mas para efeitos práticos, se a degradação levar muitos anos sob tais condições, o polímero não é considerado biodegradável [8]. Estas são questões que muitas vezes norteiam a viabilidade da implementação de bioplásticos.

No desenvolvimento de produtos com polímeros biodegradáveis deve-se considerar várias fases até o seu descarte final, e o objetivo da implementação desta tecnologia é justamente fazer com que o fim do ciclo de vida dos produtos seja positivo, sem agredir o meio ambiente. Outra característica importante refere-se ao fato de grande parte deles é proveniente de fontes renováveis, porém, é importante entender que há plásticos considerados biodegradáveis provenientes de fontes não renováveis, contudo, neste artigo o foco são os plásticos biodegradáveis considerados também bioplásticos, ou seja, de fontes renováveis.

Há avanços importantes na produção de plásticos biodegradáveis a partir de recursos renováveis, para obter materiais com desempenho comparável aos polímeros à base de petróleo [9]. Alguns fatores ambientais e socioeconômicos podem estar relacionados ao crescente interesse pelos biopolímeros são: (a) os grandes impactos ambientais, (b) processos de extração para produção dos polímeros derivados do petróleo, (c) a escassez do petróleo e aumento do seu preço [1]. Assim, o uso de matérias-primas como milho, mandioca, algas, entre outras, pode representar a redução do emprego de petróleo para a produção de polímeros, configurando uma transição de fontes não-renováveis para renováveis.

Esses atributos contribuem para a ascensão dos biopolímeros. O interesse por estes materiais aliado à maior preocupação ambiental levou a um expressivo aumento nas investigações para o uso dos mesmos [10]. A relevância dos polímeros biodegradáveis também aumentou no mercado industrial nas últimas décadas, principalmente com o crescimento de assuntos como sustentabilidade e impactos ambientais a partir da década de 1990. De acordo com Araújo *et al.* [11], a produção global de biopolímeros atingiu cerca de 2,05 milhões de toneladas em 2017 e em 2023 chegou a 2,18 milhões, com previsão de aumento para 7,43 milhões até 2028 [12]. No entanto, existem várias limitações que impedem a expansão do uso desses materiais, como custo, aplicabilidade, finalidade e adequação do descarte.

Para contribuir com a construção de um cenário do estado da arte, neste artigo, a metodologia implementada se inicia com uma revisão de literatura, fornecendo uma visão de momentos importantes na consolidação do uso de polímeros convencionais e biodegradáveis, neste sentido a pesquisa deve ser, sistemática e abrangente [13]. O trabalho visa abordar dois principais assuntos: (1) contexto histórico do surgimento e evolução dos plásticos sintéticos convencionais e (2) conceito de sustentabilidade e o surgimento e desenvolvimento dos plásticos biodegradáveis. Para isso, foi feito um levantamento de dados de publicações acadêmicas, livros, ou revistas, reconhecidos como materiais clássicos e contemporâneos, tanto nacionais quanto internacionais, abrangendo um período de publicação que vai de 1990 a 2023. É importante ressaltar que este trabalho não seguiu um caminho linear, permitindo-se certa flexibilidade no desenvolvimento teórico.

Destaca-se aqui que o foco será nos polímeros biodegradáveis, mas será apresentado um contexto histórico em relação ao plástico derivado de petróleo, pontuando eventos que marcaram a evolução desta tecnologia. Posteriormente segue-se mapeando as características do uso do plástico biodegradável, permeando a origem da tecnologia, seus segmentos de usos, limitações e oportunidades.

2. Contexto histórico do surgimento e evolução dos plásticos sintéticos convencionais

Existem alguns eixos contextuais que retratam o início da descoberta dos polímeros convencionais, a primeira tecnologia de material plástico foi à base de nitrocelulose e foi obtida por Parkes em 1862 e Hyatt em 1866 [14]. A expansão dos plásticos ou polímeros sintéticos começou por volta de 1860, quando John Wesley Hyatt desenvolveu um derivado da celulose

[9]. Ele combinou cânfora com nitrato de celulose, obtido pela dissolução de fibras de algodão em uma solução de álcool, para criar celulóide [15]. O celulóide foi comercializado pela primeira vez como uma imitação de marfim, usado para fazer uma variedade surpreendente de objetos, especialmente pequenos objetos pessoais [16]. Depois do nitrato de celulose, o formaldeído foi a próxima criação a evoluir na tecnologia dos plásticos [9], em meados de 1887, o uso da caseína (proteína do leite misturada com formaldeído) era usado para desenvolver quadros brancos, não inflamáveis [17].

Conforme Crespy, Bozonnet e Meier [18], a baquelite foi o primeiro plástico termofixo sintético e contribuiu fortemente para a entrada da humanidade na “era do plástico”. A baquelite foi descoberta em 1907 por Baekeland através da policondensação de fenol com formaldeído [14], foi muito utilizada na fabricação de telefones, cabos de painéis, hastes de tubos, gabinete de rádio, além de outros produtos da indústria elétrica e automotiva [15]. Conforme Crespy, Bozonnet e Meier [18] relatam, apesar das qualidades da baquelite, ele sofreu um declínio após a Segunda Guerra Mundial, o forte odor residual ficou associado ao momento de desespero, relacionado às lembranças da guerra, bem como à baixa qualidade das resinas sintetizadas naquele momento.

Murder e Knot [19] apontam 1912 como o ano em que o policloreto de vinila (PVC) foi descoberto, e demonstrou-se flexível, assemelhando-se a borracha ou couro quando aquecido na presença de um líquido com alto ponto de ebulição [14]. O PVC é amplamente reconhecido como o nome trivial para policloroeteno e, em termos de produção global, é um dos três polímeros mais relevantes, juntamente com o polietileno e o poliestireno [7].

O polietileno (PE) foi descoberto por Reginald Gibson e Eric Fawcett em 1933 dois químicos pesquisadores, e foi sintetizado pela primeira vez como uma resina de baixa densidade (PEBD) em 1935 [20]. Este polímero originalmente chamado de polietileno de alta pressão (PEAD) foi o resultado de um interesse em reações de ultra-alta pressão por parte do ganhador do Prêmio Nobel Robert Robinson consultor da ICI (Imperial Chemical Industries) [21]. Além do PVC e do PE, o poliestireno (PS) também é um dos polímeros mais importantes em uso, [7]. Seu uso prático foi considerado em 1902 por Kronstein e Matthews em 1911 [14]. Matthews apresentou um pedido descrevendo os processos de polimerização do monômero de estireno para produzir uma substância para a produção de artigos anteriormente feitos de madeira, borracha dura, celulóide e vidro [22]. A produção comercial do PS foi iniciada na década de 1930 pela empresa alemã BASF e foi introduzida nos Estados Unidos em 1937 [20]. A produção de PS desde 1946 se deveu à disseminação do conhecimento e à disponibilidade de monômero de estireno de alta pureza nas fábricas durante a Segunda Guerra Mundial como parte do programa de borracha sintética [22]. O polímero é relativamente resistente e é usado principalmente como material de embalagem de proteção, especialmente para equipamentos elétricos ou como placas sinterizadas para substituir papel ou papelão (Scott, [23]).

Todos estes polímeros que foram e são bastante utilizados, são provenientes de fontes não renováveis e não são biodegradáveis, por isto o contexto histórico das tecnologias de plásticos sintéticos convencionais teve um impacto significativo na sociedade como um todo, ao longo do XX. Para Geyer [24], a invenção da moderna sociedade de consumo e o crescimento econômico sustentado do período pós-guerra criaram um ambiente perfeito para estes novos materiais. Feldman [14] acrescenta que antes os polímeros eram vistos como uma especialidade química, mas a partir dali passaram a ser associados, como plásticos, fibras e elastômeros; bem como foram ligados à engenharia, através do projeto e fabricação de produtos. Contudo, a partir da última década do século XX o crescente foco na sustentabilidade em diversos setores têm impulsionado o desenvolvimento de novas alternativas às fontes convencionais de polímeros.

Os plásticos biodegradáveis têm estado presentes no mercado por vários anos e são utilizados em uma variedade de setores, cabe salientar que entre eles considera-se especialmente aqueles provenientes de fontes renováveis, ou seja, bioplásticos. Examinar o contexto geral dessa categoria de polímeros é essencial para compreender as interações dessas tecnologias ao longo de seu desenvolvimento.

2.1 O conceito de sustentabilidade e o surgimento e desenvolvimentos dos plásticos biodegradáveis

O plástico biodegradável está intrinsecamente ligado com o conceito de sustentabilidade, desempenhando um papel importante no progresso sustentável de produtos dos mais diversos segmentos. No final do século XX, as alterações climáticas e restrições de recursos fósseis, já impulsionavam o desenvolvimento de plantas para a produção de materiais de fontes renováveis necessários ao ser humano [9]. Segundo Horn *et al.* [25], em 1987 foi definido o conceito válido para a sustentabilidade pela comissão de Brundtland. Este conceito surgiu com desafios consideráveis, como crises econômicas, desigualdade social, tráfico de drogas, instabilidade política e principalmente caracterizada pela noção de escassez [26]. Como comenta Campos [27], o conceito de sustentabilidade implica em limites, os quais não são absolutos, mas impostos pela tecnologia, organização social, recursos naturais e capacidade de absorção de recursos em determinado momento histórico.

O desenvolvimento sustentável apresentou grandes limitações em seu surgimento, relacionadas ao crescimento do mercado e suas necessidades. No Brasil o desenvolvimento sustentável se popularizou a partir dos anos de 1990, com a Rio-92, que apresentava processos de negociações sobre a convenção sobre Mudanças Climáticas, Convenção sobre Biodiversidade, Protocolo de Florestas, Carta da Terra e Agenda 21 [28]. No início do século XXI, Manzini e Vezzoli [29] apontavam que a visão sobre sustentabilidade precisava ser ampla e sistêmica, para isso os autores apresentam uma visão apurada em relação ao desenvolvimento sustentável elencando alguns requisitos gerais: (I) basear-se fundamentalmente em recursos renováveis para garantir a renovação; (II) otimizar o emprego dos recursos não renováveis (compreendidos como o ar a água e o território); (III) não acumular lixo que o ecossistema não seja capaz de renaturalizar (isto é, fazer retornar às substâncias minerais originais e, não menos importante, às suas concentrações originais). Estes requisitos dizem respeito aos objetivos no desenvolvimento de plásticos, na escolha destes materiais no projeto de produto e nas decisões de compra dos consumidores.

Segundo Luckachan e Pillai [3], um dos primeiros estudos sobre o assunto de degradação de polímeros foi realizado pela obra clássica de Wolfram Schnabel em 1981, em sua obra autor discutiu quatro modos de degradação pelos processos térmicos, mecânicos e fotoelétricos. Posteriormente, Narayan [30] publicou um estudo abordando o uso de plástico biodegradável da indústria, marketing, design e na engenharia. O autor menciona que naquele contexto, em resposta ao descarte ambientalmente consciente de plásticos, surgiram duas novas indústrias: a de plásticos recicláveis e a de biodegradáveis. A crescente adoção do plástico biodegradável abriu caminho para novas possibilidades de aplicação, Petersen *et al.* [31] examinaram o potencial dos plásticos biodegradáveis, com foco particular nas embalagens, especialmente as utilizadas para alimentos. Neste estudo foi avaliado a viabilidade da utilização de bioplásticos em embalagens de alimentos como produtos de origem animal, frutas, vegetais e alimentos congelados. Quando os estudos estavam em andamento, a perspectiva futura da tecnologia de polímeros para embalagens era baseada em recursos renováveis. No entanto, as limitações associadas a esses materiais poderiam variar em termos de desempenho, processamento e custo

[31, 32]. Por outro lado, Gross e Kalra [33] conduziram uma pesquisa sobre as oportunidades oferecidas pelos polímeros biodegradáveis para o meio ambiente. Eles destacaram que um dos principais benefícios das matérias-primas renováveis, em comparação com o petróleo, é a redução na emissão de CO₂ proveniente de combustíveis fósseis. O surgimento de novas tecnologias de polímeros biodegradáveis que atendam aos requisitos de degradabilidade, compatibilidade ambiental e liberação de produtos de degradação com baixa toxicidade é a solução definitiva para esse tipo de problemas [3].

Considerando somente o final do ciclo de vida, existem três classes de polímeros biodegradáveis apresentados por Chandra e Rustgi [34], dos quais são: (a) Primeira classe são os polímeros sintéticos, com grupos vulneráveis suscetíveis ao ataque de hidrólise por micróbios; (b) Segunda classe são de polímeros bacterianos naturais, como o poli-hidroxi-butarato (PHB) e poli-hidroxi-valerato (PHV), que são altamente biodegradáveis e suscetíveis à ação de bactérias; (c) Terceira classe são misturas de polímeros e aditivos que são facilmente consumidos por microrganismos, exemplo é o uso de misturas de amido com polietileno (PE). Para Mukherjee *et al.* [4] “as características básicas dos polímeros biodegradáveis naturais são a disponibilidade e a derivação de fontes naturais e relativamente baratas, por exemplo, polissacarídeos, lignina, quitosana, amido, celulose, goma guar, colágeno e albumina”. Para Van Beilen e Poirier [35], embora o foco seja a utilização de plantas para biocombustíveis, como o bioetanol e o biodiesel, as plantas são uma fonte potencial de uma gama muito mais ampla de produtos químicos e biomateriais úteis. Os plásticos compostos de recursos renováveis (milho, tapioca, batata, açúcar e algas) e que são totais ou parcialmente biodegradáveis, biodegradáveis ou compostáveis são chamados de bioplásticos.

Segundo Pathak e Sneha [9], materiais biológicos têm vantagens potenciais para equilibrar gases de efeito estufa e impactos ambientais ao longo de ciclos de vida e com o uso de recursos renováveis, em contraste com recursos finitos. Por outro lado, Van Beilen e Poirier [35] comentam que os biomateriais muitas vezes carecem de qualidade em seu desempenho, afetando características como durabilidade e resistência, além de não terem o custo competitivo exigido para a sua utilização em produtos de consumo de baixo valor e em grande escala. Lambert e Wagner [36], enfatizam que polímeros de base biológica, mesmo não sendo biodegradáveis, podem ser potencialmente utilizados em uma variedade mais ampla de aplicações em que a biodegradabilidade não é uma propriedade desejada. Polímeros biodegradáveis necessitam de uma resistência adequada para aplicações como materiais de construção, produtos de higiene e embalagens, reduzindo problemas de descarte, como a redução da resistência à degradação microbiana quando estão no meio ambiente [4].

No avanço tecnológico dos polímeros biodegradáveis, há estudos de desenvolvimento e aprimoramento dos materiais, pode-se citar a produção de polihidroxialcanoatos (PHA), biocelulose, seda, xantana e polioésteres a partir de fermentação, também chamada de biotecnologia branca, ou por métodos químicos [35]. O açúcar do milho nos EUA e da cana-de-açúcar no Brasil tem sido a matéria-prima renovável preferida para biocombustíveis baseados em fermentação (etanol) e para a produção de produtos de base biológica, incluindo ácido polilático (PLA) [37]. Para Mores *et al.* [38] no Brasil, a produção de bioplástico a partir da cana-de-açúcar é possível devido às vantagens climáticas do país e à extensão de terras disponíveis para esta cultura. Demmer [39] menciona alternativas como algas e cana-de-açúcar para a indústria de plásticos nos EUA, porém destaca que o milho e a soja são culturas comerciais significativas e economicamente atrativas para o país. Alguns autores descrevem sistemas de alta densidade celular com amido de baixo custo, farelo de arroz ou farelo de trigo como fonte principal de carbono para produzir PHA em cultura semicontínua [40]. Assim, pode-se observar que há busca por fontes naturais para as mais diversas aplicações, o que condiz

com a afirmação de Herman Daly, citada por Meadows *et al.* [41], onde argumenta-se o uso sustentável de recursos não renováveis na mesma taxa de substituição por fontes renováveis. Porém, ainda não é evidente que isto esteja sendo feito no tempo e na quantidade necessária.

Para a sua utilização prática, atualmente, os materiais biodegradáveis são os mais importantes nas ciências médicas, podendo ser usados como implantes para substituir ossos ou outras partes do corpo, e em cirurgias, usados como suturas [8]. As principais aplicações no Brasil estão nos segmentos de embalagens de alimentos, sacolas, filmes para agricultura e produtos de consumo, usando biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes [1]. Os polímeros biodegradáveis podem desempenhar um papel significativo na recuperação de materiais, na redução do volume de resíduos em aterros e no aproveitamento de recursos renováveis [42]. De acordo com Lambert e Wagner [36], as principais áreas de aplicação para o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis incluem embalagens, utensílios descartáveis para alimentos e filmes agrícolas.

3. Considerações finais

Com o propósito de examinar o panorama histórico do uso de plásticos convencionais e biodegradáveis, este estudo apresentou dois períodos de evolução da tecnologia de polímeros ao longo da história dos materiais. Um deles remonta aos primeiros estágios de estudos, desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia, enquanto o outro emergiu em um momento de crescente interesse na sustentabilidade em vários setores, o que tem estimulado a busca por novas alternativas às fontes convencionais de polímeros.

Os polímeros biodegradáveis possuem grande importância no mercado industrial em relação a sua utilização variada. Diferentemente dos polímeros sintéticos convencionais derivados do petróleo, os polímeros biodegradáveis possuem uma degradação mais rápida que os polímeros convencionais, a biodegradação é uma solução muito promissora, uma vez que é menos agressiva ao meio ambiente, além de completar o ciclo de carbono e do nitrogênio.

Nota-se que a partir da literatura consultada e apresentada no artigo, o uso dos polímeros biodegradáveis influencia e beneficia causas que implementam a sustentabilidade como pilar estratégico. O interesse pela exploração dos polímeros biodegradáveis aliado à maior preocupação ambiental levou a um expressivo aumento nas investigações para o uso deles com base nas literaturas consultadas.

A tecnologia de biomateriais está em ascensão, impulsionando a demanda por produtos sustentáveis que causem menos impacto ambiental. No desenvolvimento de produtos com polímeros biodegradáveis, os designers devem adotar estratégias que considerem todo o ciclo de vida do produto, especialmente sua fase final, visando minimizar a agressão ao meio ambiente. Portanto, é compreensível que, apesar das restrições comerciais e físicas dos polímeros biodegradáveis, eles oferecem uma oportunidade notável para impulsionar produtos e empreendimentos que não prejudicam o meio ambiente. Pelo contrário, ressaltam que as soluções que adotam biopolímeros têm o potencial de impactar positivamente a sustentabilidade ambiental.

Conclui-se que a busca por alcançar desempenho estrutural semelhante aos polímeros sintéticos convencionais é impulsionada pelos desafios socioeconômicos e ambientais, como a escassez do petróleo e o aumento dos preços de extração.

Assim, percebe-se um amplo campo de oportunidades para conduzir estudos adicionais sobre diversos polímeros biodegradáveis. Como aplicações futuras ou adaptações deste artigo, sugere-se que haja um aprofundamento nas buscas de implementações de plásticos

biodegradáveis focando na indústria, entendendo as limitações e oportunidades de empresas que implementam este tipo de material no desenvolvimento de seus produtos. Em virtude da complexidade de acessar informações internas das empresas, seria benéfico para pesquisas posteriores buscar tais dados, a fim de compreender o uso de biopolímeros como estratégias corporativas. Integrando o design no contexto deste trabalho, uma outra possibilidade seria aprofundar o estudo para compreender qual é o papel do design no final do ciclo de vida de produtos que incorporam polímeros biodegradáveis em sua composição. Essas abordagens podem contribuir significativamente para o avanço da sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento de soluções inovadoras para os desafios contemporâneos.

Referências

- [1] BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, E. M.; MÉLO, T. J. A. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos (REMAP)*, v.6.2, p. 127-139, 2011.
- [2] HAHN, Stefan; HENNECKE, Dieter. Final Report WP4 - Comparison between natural and synthetic polymers. 2022.
- [3] LUCKACHAN, Gisha E.; PILLAI, C. K. S. Biodegradable polymers-a review on recent trends and emerging perspectives. *Journal of Polymers and the Environment*, v. 19, p. 637-676, 2011.
- [4] MUKHERJEE, Chandrapaul et al. Recent advances in biodegradable polymers— Properties, applications and future prospects. *European Polymer Journal*, p. 112068, 2023.
- [5] ASGHER, Muhammad et al. Bio-based active food packaging materials: Sustainable alternative to conventional petrochemical-based packaging materials. *Food Research International*, v. 137, p. 109625, 2020.
- [6] AMARAL, Murilo Alves do; BORSCHIVER, Suzana; MORGADO, Cláudia do Rosário Vaz. Análise do segmento de bioplásticos: prospecção tecnológica em “plásticos verdes”, PHA e PLA. *Engevista*, v. 21, n. 2, p. 228-241, 2019.
- [7] NICHOLSON, John. *The chemistry of polymers*. 3. ed. The Royal Society of Chemistry, p. 1-191, 2006.
- [8] PAVLATH, Attila E. Biodegradable polymers: Why, what, how. *Physical Sciences Reviews*, 2020.
- [9] PATHAK, Swati; SNEHA, C. L. R.; MATHEW, Blessy Baby. Bioplastics: its timeline based scenario & challenges. *J. Polym. Biopolym. Phys. Chem*, v. 2, n. 4, p. 84-90, 2014.
- [10] FALCONE, Daniele M. B.; AGNELLI, José Augusto M.; FARIA, Leandro I. L. de. Panorama Setorial e Perspectivas na Área de Polímeros Biodegradáveis. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 17, n. 1, p. 5-9, 2007.
- [11] ARAÚJO, Bruna Aline; et al. A aplicação de polímeros biodegradáveis como uma alternativa sustentável. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 9, p. e49010918248-e49010918248, 2021.
- [12] EUROPEAN BIOPLASTICS. Bioplastics market development update 2023. European Bioplastic, Berlin, Germany, 2023. Disponível em: <<https://www.european-bioplastics.org/bioplastics-market-development-update-2023-2/>>. Acesso em: 11/03/2024.

- [13] AZEVEDO, D. Revisão de Literatura, Referencial Teórico, Fundamentação Teórica e Framework Conceitual em Pesquisa – diferenças e propósitos. Working paper, 2016. Disponível em: < <https://shre.ink/8PnN> > Acesso em 09 set.2023.
- [14] FELDMAN, Dorel. Polymer history. Designed monomers and polymers, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2008.
- [15] ANDERSON, Kevin J. Bakelite: 80 Years Since the First Synthetic Resin. MRS Bulletin, v. 14, n. 7, p. 69-69, 1989.
- [16] REILLY, Julie A. Celluloid objects: their chemistry and preservation. Journal of the American Institute for Conservation, v. 30, n. 2, p. 145-162, 1991.
- [17] KRÄTZ, Otto. Aufstieg und Niedergang des Galaliths. Chemie in unserer Zeit, v. 38, n. 2, p. 133-137, 2004.
- [18] CRESPIY, Daniel; BOZONNET, Marianne; MEIER, Martin. 100 Years of Bakelite, the Material of a 1000 Uses. Angewandte Chemie International Edition, v. 47, n. 18, p. 3322-3328, 2008.
- [19] MURDER, Karel; KNOT, Marjolijn. PVC plastic: a history of systems development and entrenchment. Technology in Society, v. 23, n. 2, p. 265-286, 2001.
- [20] ANDRADY, Anthony L.; NEAL, Mike A. Applications and societal benefits of plastics. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 364, n. 1526, p. 1977-1984, 2009.
- [21] SEYMOUR, Raymond Benedict; CHENG, T. C. (Ed.). Advances in polyolefins: The world's most widely used polymers. Springer Science & Business Media, 1987.
- [22] TEACH, William Charles; KIESSLING, George Curt. Polystyrene. Reinhold, New York, NY, 1960.
- [23] SCOTT, Gerald. Polymers and the Environment. Cambridge: Royal Society of Chemistry, p. 1-148, 1999.
- [24] GEYER, Roland. Production, use, and fate of synthetic polymers. In: Plastic waste and recycling. Academic Press, 2020. p. 13-32.
- [25] HORN, Bibiana Silveira; et al. O uso do triple bottom line como uma ferramenta alternativa de sustentabilidade empresarial na sociedade de risco. Caminhos para a Sustentabilidade através do Design. In: Caminhos para a sustentabilidade através do Design. Porto Alegre: Ed. UniRitter, 2014. p. 119-132.
- [26] AMORIM, Ricardo. A tecnologia e o meio ambiente. Programa de Apoio à formação profissional. Gazeta Mercantil. 1993.
- [27] CAMPOS, Carlos Silva. Relatório Brundtland – a versão original. Disponível em: <<https://ambiente.wordpress.com/2011/03/22/relatorio-brundtland-a-verso-original/>>. Acesso em: 03 out. 2023.
- [28] CAPOBIANCO, João Paulo. O que podemos esperar da Rio 92. São Paulo em Perspectiva, São Paulo, v. 6, n. 1-2, p. 13-17, 1992.
- [29] MANZINI, Ezio; VEZZOLI, Carlo. O desenvolvimento de produtos sustentáveis: Os requisitos ambientais dos produtos industriais. Editora da Universidade de São Paulo, p. 25-25, 2002.

- [30] NARAYAN, Ramani. Biodegradable plastics. Opportunities for innovation: biotechnology, NIST GCR, p. 93-633, 1993.
- [31] PETERSEN, Karina et al. Potential of biobased materials for food packaging. Trends in food science & technology, v. 10, n. 2, p. 52-68, 1999.
- [32] DEMMER, Brian. Comparison and analysis of biobased/biodegradable and petrochemical cutlery flexibility. 2011.
- [33] GROSS, Richard A.; KALRA, Bhanu. Biodegradable polymers for the environment. Science, v. 297, n. 5582, p. 803-807, 2002.
- [34] CHANDRA, R.; RUSTGI, Renu. Biodegradation of maleated linear low-density polyethylene and starch blends. Polymer Degradation and Stability, v. 56, n. 2, p. 185-202, 1997.
- [35] VAN BEILEN, Jan B.; POIRIER, Yves. Production of renewable polymers from crop plants. The Plant Journal, v. 54, n. 4, p. 684-701, 2008.
- [36] LAMBERT, Scott; WAGNER, Martin. Environmental performance of bio-based and biodegradable plastics: the road ahead. Chemical Society Reviews, v. 46, n. 22, p. 6855-6871, 2017.
- [37] SNELL, Kristi D.; PEOPLES, Oliver P. PHA bioplastic: A value-added coproduct for biomass biorefineries. Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy, v. 3, n. 4, p. 456-467, 2009.
- [38] MORES, Giana de Vargas; FINOCCHIO, Caroline Pauletto Spanhol; BARICHELLO, Rodrigo; PEDROZO, Eugenio Avila. Sustainability and innovation in the Brazilian supply chain of green plastic. Journal of cleaner production, v. 177, p. 12-18, 2018.
- [39] DEMMER, Brian. Comparison and analysis of biobased/biodegradable and petrochemical cutlery flexibility. 2011.
- [40] HUANG, Ting-Yen; DUAN, Kon-Jen; HUANG, Shih-Yow; CHEN, C. Will. Production of polyhydroxyalkanoates from inexpensive extruded rice bran and starch by *Haloferax mediterranei*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, v. 33, n. 8, p. 701-706, 2006.
- [41] MEADOWS, D. H., J. Randers, et al. The limits to growth: the 30- year update. White River Junction, Vt: Chelsea Green Publishing Company. 2004. xxii, 338 p.
- [42] DAVIS, Georgina; SONG, J. H. Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. Industrial crops and products, v. 23, n. 2, p. 147-161, 2006.