



CAPÍTULO 3

TERMOPLÁSTICOS BIODEGRADÁVEIS DE BASE BIOLÓGICA: UM *REVIEW*

Diego Henrique Loro
Sylma Carvalho Maestrelli

RESUMO

Dentro da sociedade de consumo, desenvolvida principalmente a partir do século XX, tornou-se frequente a utilização de materiais popularmente chamados de plásticos convencionais, compostos poliméricos sintetizados a partir de fontes não renováveis, com propriedades mecânicas e térmicas excepcionais, como baixa densidade, baixa condutividade térmica e elétrica, alta ductilidade e durabilidade elevada, que favorecem as mais diversas aplicações no dia a dia. Em contrapartida, a alta produção, a baixa degradabilidade e uso de recursos fósseis tornaram os plásticos comuns em um potencial inimigo ambiental, exigindo o estudo e desenvolvimento de novos recursos para produção e degradação de polímeros dentro de uma proposta atual de economia circular. Nesse contexto, destacam-se o PLA e o PHB, polímeros termoplásticos biodegradáveis sintetizados a partir de fontes renováveis e com grande potencial para substituir os polímeros a base de petróleo. Os estudos recentes acerca do PLA e do PHB se baseiam principalmente no desenvolvimento de técnicas e processos para otimizar a degradação biológica destes termoplásticos, como a adição e combinação de compostos durante a fabricação e em pré-tratamentos para os materiais a serem degradados, como forma de aumentar a eficiência da atividade dos micro-organismos durante a biodegradação. Os principais resultados obtidos apontam que os tratamentos não térmicos são mais interessantes economicamente, devido ao menor gasto energético se comparado aos processos térmicos, além disso, os tratamentos alcalinos também indicaram uma maior taxa de produção de biogás e uma melhor biodegradação quando comparados ao PLA e PHB não tratado. Para o PHB, percebeu-se que a adição de turfa ao biopolímero proporcionou a maior perda de massa, enquanto a adição de TiO_2 retardou o processo de biodegradação e por fim, verificou-se que a variabilidade microbiológica do solo é fundamental para o processo degradativo (acima de 80%).

PALAVRAS-CHAVE: Biodegradação. Termoplásticos biodegradáveis. PLA. PHB.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de bens de consumo a partir do século XX foi caracterizado pela produção industrial de materiais a base de polímeros, os quais constituem hoje grande parte dos produtos utilizados pelo homem. Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2019) o termoplástico, uma das três subclasses dos polímeros, interage de modo intenso e diário na vida das pessoas; a versatilidade destes materiais deve-se às suas propriedades físico-químicas, tais como: baixa densidade, baixa condutividade térmica e elétrica, alta ductilidade, baixa propensão à corrosão e durabilidade elevada quando usado em ambiente adequado (sem exposição a intempéries). Ademais, os termoplásticos são materiais de fácil processamento e com baixo custo de produção (LOPES, 2010), o que favorece economicamente seu uso em larga escala.

De acordo com o relatório de 2020 da Associação Brasileira da Indústria do Plástico, documento que ilustra o panorama geral de plásticos no Brasil, no setor de transformação deste



material houve um aumento de 2,4% em 2020 em relação ao ano de 2019; este aumento afetou o mercado de exportação, já que o país exportou cerca de 130 mil toneladas de embalagens plásticas para EUA e Europa (ABIPLAST, 2020). Portanto, a indústria de plásticos representa um mercado competitivo e em constante crescimento, além de uma importante área de pesquisa tecnológica.

A alta aplicabilidade dos materiais termoplásticos em diversos setores produzem também subsequente carga residual poluente, decorrente principalmente do tempo elevado para a degradação do composto, o qual pode levar até 400 anos para se decompor no ambiente quando exposto apenas aos fatores naturais como luz, calor e bactérias (TELLES; SARAN; UNÊDA-TREVISOLLI, 2011). Além do mais, o uso em larga escala de polímeros gera ainda esgotamento de matéria-prima, haja visto que os termoplásticos comuns são derivados de compostos petroquímicos, os quais são oriundos de fontes não renováveis.

De acordo com Silva *et al.* (2021), o contexto da pandemia COVID-19 também interferiu significativamente no uso de plásticos, aumentando a geração de resíduos devido ao alto volume de produção e compra, além do crescimento no consumo de EPI's (equipamentos de proteção individual). Estima-se um aumento de 40% de plásticos para embalagens e de 17% em outras aplicações, como no uso médico, principalmente na produção de máscaras, protetores faciais e luvas descartáveis.

Segundo Cardoso *et al.* (2009), grande parte destes resíduos é destinada a aterros e lixões sem estrutura adequada ou simplesmente descartados na rua ou no meio ambiente, o que resulta na poluição de solos e águas, obstruções na drenagem urbana e/ou morte de animais marinhos pela ingestão destes resíduos. Por conseguinte, para reduzir o impacto dos termoplásticos no ambiente, é imprescindível o gerenciamento dos resíduos e, desta forma, a estratégia da reciclagem pode ser introduzida, considerando as diferentes alternativas de destinação em função das inúmeras propriedades dos materiais termoplásticos. Contudo, medidas de reciclagem ainda se mostram insuficientes no tratamento do grande contingente de lixo, sendo necessário desenvolvimento e aprimoramento de novos materiais menos poluentes e/ou que permitam a degradação dos termoplásticos em tempos menores.

2. JUSTIFICATIVA

Mediante o exposto apresentado, é essencial a produção de substitutos para esses polímeros, que sejam ambientalmente sustentáveis. Uma alternativa são os plásticos biodegradáveis, compostos dotados da capacidade de se decompor mais rapidamente e voltar



para o meio ambiente na forma de gás carbônico, água e metano. Outra vantagem destes compostos é a sua possibilidade de serem degradados por micro-organismos presentes no próprio meio, sem que ocorra ainda a geração de resíduos tóxicos (MACHADO, 2008).

Segundo Ray e Bousmina (2005), polímeros biodegradáveis podem ser sintetizados através de diversas fontes naturais e renováveis. As principais matérias primas vegetais são o milho, a batata, a cana de açúcar e a celulose; podem ainda serem derivados de matérias-primas de fonte animal, como a quitina, a quitosana ou proteínas ou serem sintetizados por microrganismos sob um determinado substrato. Embora se tenha diversos recursos para a produção desse termoplástico, é necessário levar em consideração a questão de que algumas destas fontes são culturas alimentícias (como o caso do milho e da batata), sendo importante garantir prioridade para este uso alimentar e buscar compostos que sejam resíduos passíveis de reaproveitamento para síntese do biopolímero, tal como a cana-de-açúcar.

Em um sistema de economia circular, os plásticos de base biológica, polímeros derivados parcial ou totalmente da biomassa, surgem como uma possibilidade de produção sustentável, substituindo o uso de combustíveis fósseis por recursos renováveis. Os polímeros de base biológica ainda possuem o potencial de aumentar as metas de reciclagem e diminuir a pegada de carbono, favorecendo a eficiência na gestão de resíduos sólidos, de forma a reduzir os impactos ambientais causados pelo lixo plástico convencional (SILVA *et al.*, 2021). Os poliésteres alifáticos como o ácido polilático (PLA) e os polihidroxicanoatos (PHA) são importantes biopolímeros biodegradáveis, de interesse na fabricação de embalagens, EPI's e demais plásticos de uso único, devido principalmente às suas propriedades termofísicas sustentáveis e taxas de degradação ajustáveis (SOUZA, 2015).

Para tratar o grande contingente de resíduo plástico produzido atualmente, desenvolveu-se uma série de processos físico-químicos. Segundo Franchetti e Marconato (2006) os principais métodos destinados a esses polímeros são a incineração, a reciclagem, os aterros sanitários e a biodegradação.

Neste contexto, a taxa de produção de plásticos convencionais e a sua disposição em aterros, atrelado com o rápido crescimento da indústria de consumo mundial, revelam que o modelo econômico tradicional baseado nos processos extração de recursos, produção, consumo e descarte, não é mais uma opção viável no século XXI. A nova abordagem propostas por defensores do meio ambiente defendem um sistema de fabricação capaz de garantir que os produtos utilizados atualmente proporcionem recursos materiais para que novos produtos sejam



desenvolvidos futuramente, em um modelo de economia circular (DONNER; GOHIER; VRIES, 2020).

Desse modo, torna-se fundamental o desenvolvimento e aprimoramento dos processos que visam tratar os resíduos plásticos. Neste contexto, a biodegradação aplicada aos termoplásticos pode significar um grande avanço na produção do material e no gerenciamento de resíduos, tanto do polímero produzido e futuramente descartado, quanto da matéria prima utilizada. Dessa forma, tendo em vista os problemas apresentados relacionados ao uso dos termoplásticos comuns, este trabalho objetivou fazer um levantamento bibliográfico sobre termoplásticos biodegradáveis de base biológica.

3. DEGRADAÇÃO

A degradação pode ser entendida como qualquer reação que altere as características de interesse do material ou composto polimérico, sendo que essas qualidades são modificadas no decorrer do tempo em função de inúmeros ataques físicos ou químicos, a degradação pode ser um processo involuntário ou voluntário, dependendo do que o material estará sujeito durante o seu processamento ou uso final (COSTA; RAMOS; CYRINO, 2021).

Segundo Innocentini-Mei e Mariani (2005) a degradação completa de um polímero abrange duas etapas: a fragmentação e a mineralização. A fragmentação corresponde ao primeiro estágio da degradação, no qual o material será quebrado em partículas suficientemente pequenas para serem utilizadas pelos micro-organismos; corresponde ao desaparecimento visual do plástico. Na segunda etapa, a mineralização, os produtos fragmentados anteriormente são agora digeridos pelos micro-organismos para obtenção de energia, liberando para o meio substâncias como dióxido de carbono, água e outros produtos biocompatíveis. Schlemmer (2007) define a degradação de um material plástico como um processo irreversível que altera de forma significativa a estrutura desse material através de mudança nas propriedades ou fragmentação do material e, para que esse processo esteja completo, deve haver a formação de dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e outros produtos bioassimiláveis.

A degradação poder ser dividida em 5 categorias, sendo elas: fotodegradação (por luz), termodegradação (por temperatura), hidrólise (presença de água), degradação oxidativa (presença de oxigênio) e biodegradação (por microrganismos).

De maneira sucinta, a fotodegradação é a exposição de polímeros à radiação ultravioleta que estimula reações químicas que atreladas à processos fotofísicos, oxidativos e hidrolíticos e causam alteração nas cadeias do polímero, nas propriedades mecânicas, surgimento de fissuras



e fraturas e perda de brilho (LOMBARDO; POLI; SCHMITT, 2015); já a termodegradação de um polímero pode ser irreversível quando a temperatura de um polímero termoplástico fundido é aumentada em excesso; um exemplo desse efeito é a descloração do PVC sem a adição de estabilizantes a fontes de calor, radiações ultravioleta e gama por períodos de tempo prolongados acabam gerando a liberação de cloreto de hidrogênio acompanhados de uma sequência poligênicas e ligações cruzada na sua cadeia (RODOLFO JUNIOR; MEI, 2007). No que se refere à hidrólise, segundo Domingos *et al.* (2013), termoplásticos, como o PA-11 (poliamida 11), sofrem processos de degradação principalmente pela água contida nos fluidos que transportam e pela acidez (CO₂, H₂S, ácidos orgânicos e inorgânicos) e como consequência, há uma perda de propriedades desse termoplástico, como por exemplo: variações em sua morfologia, perda de elasticidade e principalmente a redução da massa molar, já que a reação hidrolítica é catalisada pela presença de água.

A degradação oxidativa ocorre na maioria dos polímeros através da reação de radicais livres, catalisados pela temperatura. Um exemplo comum de degradação termo-oxidativa é o PET em seu reprocessamento, sendo um fenômeno indesejado neste processo, pois há a formação de quinonas e ésteres insaturadas advindos da hidroxilação do anel aromático fazendo com que a coloração do material se torne turva, dessa forma essa degradação deve ser evitada quando propriedades ópticas são obrigatórias para o material (ROMÃO *et al.*, 2009). Já a degradação biológica dos materiais termoplásticos é definida como biodegradação e, segundo Machado (2008), é um processo biológico de nutrição e respiração, no qual microrganismos utilizam-se da matéria orgânica constituinte de um resíduo para obtenção de energia, devolvendo para o meio, resíduos mais simples e menos poluentes como gás carbônico, água e nitratos. Portanto, são classificados como biodegradáveis materiais capazes de serem decompostos por atividade microbiana, seguindo uma série de critérios que levam em consideração parâmetros como o tempo e o grau de degradação. Segundo Awasthi *et al.* (2022), a biodegradação de polímeros é, geralmente, composta por quatro fases: a biodeterioração, a biofragmentação, a assimilação e a mineralização. Sendo que na primeira fase ocorre a alteração das características físico-químicas dos polímeros, decorrente da degradação de fatores ambientais abióticos que fragmentam o material, levando à formação de biofilmes microbianos, que na segunda fase produzirá enzimas (despolimerase) que convertem estes fragmentos em sua forma de monômeros ou oligômeros, para na fase seguinte, serem assimiladas e utilizadas pelos micro-organismos e finalmente serem completamente mineralizados, ou seja, convertidos em gás carbônico, metano e água.



4. BIOPLÁSTICOS

Matérias-primas renováveis, como por exemplo: madeira, palha, açúcar, milho, mandioca, algas e outros resíduos biológicos podem ser usados como referência para biomassa e por sua vez, um bioplástico, é definido como aquele material que advém totalmente ou parcialmente da biomassa (NASCIMENTO; SANTOS; SILVA, 2022). De acordo com Amorim (2019), plásticos que possuem como principal característica alta durabilidade não pode ser considerado como biodegradáveis, mas podem ser de base biológica, por isso, deve-se elucidar duas características relacionadas aos bioplásticos: ser de base biológica, ou seja, derivar de biomassa e/ou a decomposição do plástico não causa impacto ambiental, pois as ações de micro-organismos causam a degradação total do material.

Para a produção dos bioplásticos derivados de fontes renováveis pode-se utilizar matérias primas como milho, batata ou cana de açúcar, sendo imprescindível a extração de açúcar e amido, constituintes fundamentais para a síntese dos polímeros. Contudo, o fato de a matéria-prima ser renovável não garante ao plástico biodegradabilidade, visto que essa é uma propriedade que depende da compatibilidade do composto com uma estrutura química proveniente da ação microbiana (SECOM, 2007). Porém, o fim de vida do bioplástico biodegradável não termina como um resíduo, o material final está sujeito à ação de micro-organismos, que degradaram o polímero, transformando-o em água, CO₂ e nutrientes.

Entre os setores que mais aderem aos materiais bioplásticos destacam-se as indústrias de embalagens, devido à crescente aceitação de produtos ecologicamente corretos por parte da população e a preservação das características físicas dos plásticos convencionais (maleabilidade, atoxicidade e leveza). Porém, a maior vantagem do bioplástico sobre o tradicional refere-se essencialmente à questão do lixo: enquanto uma sacola comum leva cerca de 450 anos para se decompor, a mesma, se biodegradável, pode levar apenas um ano (SECOM, 2007).

Segundo Nascimento, Santos e Silva (2022), essa redução de tempo de degradação é importante pois este material facilita a dissociação parcial de suas fontes primárias (biomassa), além de possuir potencial para diminuir as emissões de gás carbônico e o uso desse material retém a dependência do uso do petróleo na cadeia produtiva. Um exemplo deste material é o Polietileno Verde advindo de fonte renovável como o etanol de cana de açúcar, que agrega um balanço ambiental positivo já que para sua produção são retiradas cerca de 2,5 toneladas de



CO₂ da atmosfera, além do benefício ambiental, há um incremento no valor agregado da matéria prima (açúcar e etanol) devido a uma disputa pelo mercado de plásticos.

Apesar de todas as vantagens, os biopolímeros possuem algumas limitações técnicas que tornam difícil seu processamento industrial e seu uso como produto final (BRITO *et al.*, 2011). Castro (2019), pontua que a maior limitação na cadeia produtiva dos bioplásticos é obter matéria-prima suficiente da agricultura e a existência de uma falta de confiança do consumidor em adquirir os bioplásticos, fazendo com que as indústrias químicas adaptem-se aos processos e características existentes a plásticos não biodegradáveis, um exemplo disso é o custo de produção de bioplásticos, como por exemplo: o PE, PLA e PHA que chegam a cinco euros por quilograma enquanto o PET custa abaixo de dois e cinquenta euros por quilograma. No ano de 2019 a capacidade global de produção de bioplásticos foi de 2,11 milhões de toneladas, o que representou apenas 1% dos plásticos produzidos, sendo previsto atingir uma produção de 2,44 milhões de toneladas em 2024 (DEDIEU *et al.*, 2022).

Como polímeros de base parcialmente biológica e não biodegradável se encontram: o propionato de acetato de celulose (CAP), o tereftalato de polietileno (PET), o tereftalato de polítrimetileno (PTT), um policarbonato à base de isossorbida (PC) e um uretano termoplástico (TPU). Já como polímeros de base parcialmente biológica e biodegradável pode ser destacado: o acetato de celulose (CA), succinato de polibutileno (PBS), adipato de succinato de polibutileno (PBSA) e um material de mistura específico à base de amido termoplástico (TPS) (BEUKELAER *et al.*, 2022). Existem ainda os polímeros biodegradáveis de base não biológica, como a Policaprolactona (PCL), o tereftalato de polibutileno adipato (PBAT) e o ácido poliglicólico (PGA). Por fim, o polipropileno (PP) que é de base fóssil e não biodegradável, também foi incluído no estudo por representar um dos materiais plásticos industriais mais utilizados atualmente (BEUKELAER *et al.*, 2022).

Segundo Costa (2020), devido aos processos de poluição ambiental, aquecimento global e a possível escassez de suprimentos de petróleo é crescente a busca pelo desenvolvimento de novos polímeros de base biológica e biodegradáveis. Dessa forma, é fundamental a ampliação dos estudos de caracterização e modificação de biopolímeros, visando viabilizar o processamento e o uso dos mesmos em diversas aplicações.

5. POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS DE BASE BIOLÓGICA

Os impactos ambientais causados pela ação antrópica vêm trazendo cada vez mais problemas ao mundo e para cessar ou ao menos reduzir esse impacto, novas fontes renováveis



vêm sendo exploradas, entre essas estão os polímeros biodegradáveis, compostos orgânicos que sofrem a degradação por ação de micro-organismos como bactérias, fungos e algas (BRITO *et al.*, 2011), além disso também estão dependentes de fatores ambientais como sol, calor e umidade (INNOCENTNI-MEI; MARIANI, 2005).

De acordo Brito *et al.* (2011) os polímeros biodegradáveis podem ser produzidos a partir de diversas matérias-primas e são divididos principalmente em quatro grupos, classificando-os de acordo com sua origem, a qual pode ser: de fontes renováveis (animal ou vegetal), de micro-organismos, de atividade biotecnológica (síntese convencional a partir de bio-monômeros) e de compostos petroquímicos.

Maraveas (2020) também dividiu os polímeros biodegradáveis em quatro categorias: (I) os polímeros naturais, tais como amido, celulose, proteínas...; (II) os biopolímeros produzidos diretamente por organismos naturais ou geneticamente modificados, como poliésteres microbianos; (III) os polímeros produzidos por síntese química de monômeros de base biológica, como PLA; e (IV) os polímeros sintetizados convencionalmente a partir de monômeros à base de fósseis.

De acordo com Armentano (2018), um dos biopolímeros mais promissores atualmente é o ácido polilático (PLA), tanto pela sua obtenção de produtos agrícolas, como por sua biodegradabilidade e o poli(hidroxibutirato) (PHB), um bioplástico que possui uma resistência e durabilidade semelhante aos plásticos convencionais à base de petróleo (PARK, 2021).

5.1 Ácido Polilático (PLA)

O ácido polilático (PLA) é um termoplástico biodegradável de base biológica sintetizado pela primeira vez pelo cientista da DuPont, Carothers, em 1932. Atualmente, o PLA pode ser produzido por três principais processos: pela fermentação de recursos renováveis, por meio da polimerização por condensação de moléculas de ácido lático ou por meio da polimerização por abertura de anel de lactídeo sob catalisador (TOKIWA *et al.*, 2009).

Atualmente, o PLA é o poliéster alifático biodegradável mais utilizado. É formado pelo monômero ácido lático, uma molécula que pode ser produzida pela fermentação da glicose, obtida de diversas fontes de açúcar como a cana-de-açúcar, o milho e a batata. Após o processo de polimerização, as moléculas de ácido lático se unem formando um copolímero semelhante ao PET e PP, com boas propriedades mecânicas e resistência à água, porém com algumas desvantagens como fragilidade e rigidez. Ele é utilizado principalmente na fabricação de embalagens (copos, tigelas e potes), em utensílios descartáveis e garrafas plásticas moldadas



por injeção e sopro (SPRAICAR; HORVAT; KRZAN, 2012).

Buscando avaliar e melhorar o desempenho de embalagens à base de PLA, Lorite *et al.* (2017) realizaram estudos comparativos entre o PET convencional, o PLA puro e o PLA com adição de nanoargila e surfactante, submetendo suas amostras à testes físico-químicos e microbiológicos. Os autores avaliaram que a adição de nanoargila e surfactante às embalagens PLA melhorou as propriedades do PLA puro, aproximando ainda mais seu desempenho ao do PET, além de se mostrar uma alternativa competitiva também ambientalmente.

Boonluksiri, Prapagdee e Sombatsompop (2021) estudaram processos para acelerar a biodegradação do ácido polilático, baseados na combinação de extratos de esterco/lodo de esgoto, com presença ou não de diferentes fontes de nitrogênio sob condições submersas (enterradas no solo). Os resultados obtidos pelos autores revelaram que a adição de soja como fonte de nitrogênio, extrato de esterco e de lodo contribuíram para o aumento de perda de peso do PLA em quase 100% em 60 dias, dessa forma, concluiu-se que a adição de soja aos extratos aumentou a atividade microbiana e, conseqüentemente, a biodegradação do PLA no solo.

Em ambiente adequado, o PLA possui uma degradação que varia de 6 meses a 2 anos, de acordo com fatores do produto e do meio, dependendo do tamanho e da forma do componente e da temperatura por exemplo (XIAO *et al.*, 2012). Armentano (2018) destacou quatro fenômenos principais relacionados à degradação: a absorção de água, seguida da clivagem de éster e formação de fragmentos de oligômeros, solubilização dos fragmentos de oligômeros para, enfim, ocorrer a difusão de oligômeros solúveis por bactérias.

A fim de estudar o comportamento do PLA em aterros sanitários, Kolstad *et al.* (2012) realizaram estudos baseados em dois testes de degradação, obtendo informações referentes à biodegradação anaeróbica do PLA sob condições de temperaturas de 20°C a 35°C e tempo prolongado. O primeiro teste foi realizado em condições aceleradas de aterro durante 390 dias e o segundo foi um teste de digestão anaeróbica com alto teor de sólidos em condições ótimas durante 170 dias, com objetivo de representar uma simulação acelerada de como ocorreria a biodegradação do PLA em um aterro sanitário sob condições anaeróbicas. Ambos os testes revelaram que a degradação biológica simulada foi suficiente para ser equivalente a cerca de um século de um aterro sanitário “típico”.

Uma vez que o PLA é amplamente comercializado como polímero biodegradável, criou-se uma visão equivocada de que o PLA simplesmente irá desaparecer quando depositado em aterros sanitários; porém, como exposto também por Kalogirou *et al.* (2022), a degradação



completa do PLA na natureza pode durar décadas. Assim, uma solução cada vez mais estudada são os pré-tratamentos das superfícies do polímero, que correspondem à processos físico-químicos considerados necessários para que adesão microbiana ao polímero seja mais eficaz.

De acordo com Zoborowska *et al.* (2023) a reciclagem orgânica atualmente é a principal opção para o PLA, principalmente a digestão anaeróbica (AD), pois permite que a matéria orgânica se decomponha e ainda produza biogás. Porém, ainda são necessários estudos referentes ao pré-tratamento do PLA e aprimoramento nas técnicas de determinação e monitoramento da sua biodegradabilidade, pois a maioria dos estudos, segundo o autor, se baseiam apenas no parâmetro de produção de metano (MP) ou biogás durante o processo. Em seu estudo, Zoborowska *et al.* (2023) realizaram testes de pré-tratamento hidrotérmico (HT) (2 h, 90 °C) e alcalino (A) (2 h, 0,1 M KOH, temperatura ambiente) na avaliação da biodegradabilidade do PLA em condições termofílicas (acima de 45°), revelando que o tempo para obter a máxima produção de metano foi encurtado ao se utilizar pré-tratamento, principalmente o hidrotérmico, que diminuiu o tempo de MP máximo em mais de 2 semanas se comparado com PLA não tratado, além do metano ser produzido a uma taxa cerca de 10 % maior.

Samitthiwetcharong e Chavalparit (2019) estudaram um pré-tratamento alcalino de filmes de PLA com hidróxido de sódio em pH 13 (60 horas, NaOH 0,5 M) promovendo a degradação do PLA e a produção de biogás em uma atividade anaeróbica mesófila (20 a 40°C). O PLA pré-tratado alcalino foi co-digerido com resíduos alimentares, o que proporcionou um maior rendimento (1,6 vezes maior) de metano se comparado ao PLA não tratado.

Um pré-tratamento termoalcalino foi investigado por Samitthiwetcharong *et al.* (2017), por meio da avaliação do aumento da degradação de filmes PLA e na produção de biogás. As condições estudadas (0,5 M de NaOH, 60 °C e 24 horas) revelaram que os principais parâmetros que influenciaram na degradação foram a concentração de NaOH e o tempo de reação, já a temperatura foi menos significativa. Os filmes pré-tratados produziram cerca de 3,7 vezes mais biogás que os filmes não tratados, além disso a máxima biodegradabilidade do PLA foi de 20,14% para o filme pré-tratado contra 4,32% do não tratado, cerca 4,7 vezes maior, demonstrando que o pré-tratamento termoalcalino auxilia na deterioração da superfície dos filmes, possibilitando uma maior assimilação das enzimas microbianas posteriormente.

Cazaudehore *et al.* (2022) realizaram uma série de estudos referentes aos impactos de pré-tratamentos mecânico e termoquímico a fim de melhorar a biodegradação anaeróbia



mesófila. No pré-tratamento mecânico foi realizado moagem e peneiramento de 2mm, o que melhorou a taxa de biodegradação, porém manteve semelhante a produção de metano. Já o pré-tratamento termoalcalino provou uma melhora na solubilização do PLA, além de aumentar o potencial de produção de metano, sendo que a melhor condição de pré-tratamento encontrada pelos autores foi a 70 °C por 48 h na presença de 2,5% p/v Ca(OH)₂, o que ocasionou uma taxa de biodegradação de 73% em 30 dias.

Um pré-tratamento físico não térmico a base de plasma foi estudado por Song *et al.* (2015), no qual filmes embalagens de alimentos de PLA foram expostos a plasma frio (CP) por 40 minutos, a 900 W e 667 Pa, partindo do oxigênio como gás formador de plasma. Os autores descobriram que a amostra de PLA após ser tratada com plasma apresentou uma perda de peso imediata, além de aumentar a natureza hidrofílica do polímero.

Nos últimos anos inúmeros estudos referentes à pré-tratamentos químicos e físicos demonstraram a possibilidade de aumentar efetivamente a biodegradação do PLA, através da oxidação e de mudanças na superfície dos polímeros, levando a uma melhor assimilação pelos micro-organismos e melhorando as taxas produção de biogás. Percebe-se ainda, que os tratamentos físicos não térmicos são economicamente mais interessantes devido ao menor gasto energético se comparado às técnicas térmicas, dessa forma, é esperado que os pré-tratamentos possam ser cada vez mais estudados e incorporados aos processos de biodegradação de polímeros dentro da economia circular (YASIN; AKKERMANS; IMPE; 2022).

5.2 Poli (Hidroxibutirato) (PHB)

Outra classe de polímeros biodegradáveis amplamente estudada atualmente são os polihidroxicanoatos (PHAs), poliésteres sintetizados microbianamente por diversos microrganismos, por meio de processos de fermentação de açúcares e lipídios. Os polímeros do tipo PHA podem ser divididos de acordo com número de átomos de carbono e na composição de seus monômeros, o que influencia diretamente em suas propriedades físico-químicas (ALSAADI, 2022).

O Poli (hidroxibutirato) (PHB) é principal membro da família dos hidroxilcanoatos, sendo produzido por diversas bactérias como meio de armazenar energia. De acordo com Tokiwa *et al.* (2009), este polímero tem sido foco de pesquisa ao redor do mundo e com grande interesse comercial devido sua possibilidade de síntese por meio de recursos renováveis de baixo preço, além de operação de polimerizações de baixo impacto ambiental.

Segundo Maraveas (2020), os métodos de síntese microbiana para produção de PHB



depende da principalmente da matéria-prima, que deve ser um precursor rico em carbono que servirá de alimento para as bactérias no meio de cultura. De acordo com o autor, ao comparar o PHB com outros biopolímeros, este se adequa melhor em aplicações que exigem alta resistência, já que suas propriedades mecânicas se assemelham aos biopolímeros de base fóssil, como o PP.

Quanto à biodegradação, o PHB pode ser degradado tanto em ambientes aeróbicos e anaeróbicos, sem contar com a formação de produtos tóxico, sendo suscetível à ação de diversos microrganismos, que puderam ser isolados do solo (*Pseudomonas lemoigne*, *Comamonas sp.*, *Acidovorax faecalis*, *Aspergillus fumigatus* e *Variovorax paradoxus*), de lodos ativado e anaeróbios (*Alcaligenes faecalis*, *Pseudomonas*) e de água de lago (*testosterona Comamonas*, *Pseudomonas stutzeri*) de acordo com Tokiwa *et al.* (2009).

Hoffman *et al.* (2019) buscou determinar qual era a taxa média de biodegradação do PHB e estimar seu tempo de vida no ambiente marinho, a partir de uma revisão da literatura atual. Os autores obtiveram como principal resultado a taxa média de biodegradação de PHB no ambiente marinho, sendo de 0,04 a 0,09 mg/dia.cm², o que corresponderia para uma garrafa plástica um tempo de vida médio estimado aproximadamente em 1,5 a 3,5 anos. Dey e Tribedi (2018) avaliaram em seu estudo a interferência da diversidade microbiana na degradação de biopolímeros no solo. Partindo de cinco amostras de solo de aterro e avaliando os parâmetros microbiológicos de cada uma, os autores observaram que os solos possuíam uma heterogeneidade microbiana e que possivelmente influenciaria na biodegradabilidade do PHB que foi incubado em cada amostra. Os resultados evidenciaram que quanto maior era a diversidade biológica do solo maior era a biodegradabilidade do PHB, confirmando a hipótese de correlação positiva de biodiversidade e biodegradabilidade.

A biodegradação do poli (hidroxibutirato) com adição de cargas naturais foi estudado por Thomas *et al.* (2020). Os autores preparam compósitos de PHB com adição de argila, turfa e farinha de madeira de bétula, na forma de pallets e grânulos. A biodegradação das amostras em solo foi acompanhada durante 35 dias e mostraram uma diminuição da massa residual em ambos formatos e composições, a massa residual dos pallets foi para 68% para PHB puro, 56,4% para PHB com turfa, 67% para PHB com farinha de madeira e 64% para PHB com argila. Já a massa residual dos grânulos de PHB puro foi de 68,4%, PHB com turfa 46,4%, PHB com farinha de madeira 77% e PHB com argila 74%, mostrando a possibilidade de produção de PHB biodegradáveis com adição de diferentes cargas.



Altae *et al.* (2016) avaliaram a biodegradação de filmes de PHB e PHB-TiO₂ em solo fértil de pH 7,30 e umidade de 80% a 30°C, na qual descobriram que a adição de nanopartículas de TiO₂ nos filmes compósitos atrasou o processo de biodegradação se comparados aos filmes de PHB puro. Os autores testaram ainda um tratamento de luz UV sob os filmes de PHB, no qual perceberam uma degradação mais rápida do que os com filmes sem pré-tratamento.

As avaliações de pré-tratamentos físico-químicos também foram analisadas para estudo de interferência na biodegradabilidade do PHB, assim como o PLA. Benn e Zitomer (2018) realizaram pré-tratamentos térmicos e químicos a fim de aumentar a taxa de digestão anaeróbica do PHB em conjunto de co-digestores com uma alimentação de lodo primário sintético, mantidos por um período de 170 dias, no qual foram realizados utilizando tanto o polímero não tratado, como o pré-tratado, sob condições alcalinas e de temperatura elevada. O pré-tratamento do PHB nas condições de 55°C, pH ≥ 10 e ≥ 24 h apresentou uma co-digestão anaeróbica mais rápida e completa do que o PHB não tratado, além disso, o pré-tratamento aumentou a produção de biometano em aproximadamente 6%, revelando-se uma técnica promissora para aprimoramento da biodegradabilidade do PHB.

Venkiteshwaran *et al.* (2019) investigaram em seu trabalho os efeitos da co-digestão anaeróbica de PHB com lodo primário sintético juntamente com a aplicação ou não de pré-tratamentos. O PHB pré-tratado (55 °C, pH 12) provocou uma redução no atraso de produção de metano (5 dias mais curto), de tal forma que os co-digestores converteram o PHB não tratado em 86% de metano e o pré-tratado em metano em 91%, revelando que pré-tratamentos de PHB em pH e temperatura altos pode levar a uma redução no tempo de atraso do digestor.

Portanto, inúmeros fatores podem influenciar a biodegradação do PHB no solo, como as condições do ambiente, as propriedades do matérias, a presença de micro-organismos e os pré-tratamentos, além da adição de outros compostos, fatores esses que podem tornar este termoplástico mais competitivo no mercado. Entretanto, ainda são necessários estudos mais abrangentes e desenvolvimento de novas técnicas, com o objetivo de testar e validar a biodegradação do PHB e suas possíveis misturas e pré-tratamentos, em conformidade com os parâmetros ambientais e atendendo às necessidades humanas (FERNANDES *et al.*, 2020).

6. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado um levantamento bibliográfico acerca dos principais polímeros termoplásticos biodegradáveis, reunindo informações referentes à caracterização, degradação e pré-tratamentos destes materiais. A pesquisa foi



realizada a partir da busca de informações em sites, noticiários e por meio do Portal Periódicos CAPES em busca de artigos científicos, partindo de palavras chaves como: polímeros, termoplásticos biodegradáveis, biodegradação, PLA e PHB, visando obter informações atuais.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dessa pesquisa fornecem um *review* acerca dos principais termoplásticos biodegradáveis de base biológica da atualidade e de grande potencial de pesquisa e utilização comercial futuramente. Esclareceu-se ainda a definição e diferenciação de termos comuns como plásticos, bioplásticos, polímeros e biodegradação, sendo possível a identificação do ácido polilático (PLA) e do poli (hidroxibutirato) (PHB) como os termoplásticos biodegradáveis de base biológica mais promissores atualmente.

Inúmeras técnicas de avaliação de degradação, adição de cargas e pré-tratamentos foram investigados nos últimos anos pela comunidade acadêmica acerca do PHB e PLA. Constatou-se que os termoplásticos poli (hidroxibutirato) (PHB) são totalmente degradáveis, enquanto o ácido poli láctico (PLA) são apenas parcialmente degradáveis (AWASTHI *et al.*, 2022), sendo fundamental a aplicação de pré-tratamentos, que visam deteriorar e modificar a superfície dos polímeros, favorecendo a assimilação pelos micro-organismos e a produção de biogás.

Com base nas informações reunidas no levantamento bibliográfico confirma-se a viabilidade da utilização do polímero biodegradável PLA como uma alternativa aos plásticos comuns de base fóssil, porém com base nos estudos de degradação verificou-se que o PLA não possui uma biodegradabilidade 100% efetiva, sendo fundamental a aplicação de pré-tratamentos a fim de aumentar a eficácia da assimilação microbiológica ao material em processo degradativo. Dentre os pré-tratamentos térmico e físico-químicos verificou-se que os tratamentos térmicos, apesar bons resultados, necessitariam um maior gasto energético para utilização em larga escala, dessa forma, os tratamentos físicos não térmicos são economicamente mais interessantes, além disso, os tratamentos alcalinos também indicaram uma maior taxa de produção de biogás e uma melhor biodegradação quando comparados ao PLA não tratado.

Dentro dos poli (hidroxialcanoatos) o principal polímero atual identificado foi o PHB, um termoplástico biodegradável de base biológica amplamente estudado e com grande potencial comercial. Os principais estudos acerca do PHB buscam avaliar o comportamento da biodegradabilidade quando adicionadas cargas, além de alguns pré-tratamentos como ocorria com o PLA.



Com base nas informações obtidas neste levantamento bibliográfico também se confirma a viabilidade da utilização do polímero biodegradável PHB como uma alternativa aos plásticos comuns de base fóssil, possuindo uma biodegradabilidade mais efetiva que o PLA. Os estudos recentes buscaram avaliar principalmente o efeito na biodegradabilidade pela adição de diferentes compostos ao PHB, de tal forma que a adição de turfa ao polímero proporcionou a melhor perda de massa, enquanto a adição de TiO_2 atrasou o processo de biodegradação. Verificou-se ainda que o tratamento termoalcalino aumentou a biodegradação e que a variabilidade microbiológica do solo é fundamental para o processo degradativo.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de polímeros biodegradáveis vem se mostrando como uma alternativa viável ao uso de plásticos comuns de base fóssil, sendo o PLA e PHB os principais termoplásticos de base biológica da atualidade. Os estudos mais recentes, além de apontar estes dois polímeros como os mais promissores, também concentram suas atenções no desenvolvimento de meios de otimizar a biodegradação, seja pela adição de cargas ou utilização de pré-tratamentos, principalmente os físicos não térmicos e os químicos alcalinos, que facilitam a assimilação dos micro-organismos e conseqüentemente, aumentam a taxa de degradação e produção de biogás.

Conclui-se, portanto, que dentro de uma proposta de economia circular o PLA e PHB são os polímeros biodegradáveis de maior enfoque na atualidade e alvos de inúmeras pesquisas, que visam a análise e desenvolvimento de técnicas de produção e pré-tratamentos, além de testes de simulação de biodegradação. Dessa forma, novos processos estão sendo frequentemente testados, em busca de métodos cada vez mais eficazes e com resultados ainda melhores que os obtidos até o momento, de forma a produzir termoplásticos com as propriedades desejadas e sendo sintetizados através de fontes renováveis, mas que ainda sejam capazes de se biodegradar.

REFERÊNCIAS

ALSAADI, A. *et al.* Polyhydroxyalkanoate (PHA) Biopolymer Synthesis by Marine Bacteria of the Malaysian Coral Triangle Region and Mining for PHA Synthase Genes. **Microorganisms**, [s. l.], v. 10, n. 10, Oct. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10102057>. Acessado em: Nov. 2022.

ALTAAE, N. *et al.* Biodegradation of different formulations of polyhydroxybutyrate films in soil. **SpringerPlus**, [s. l.], v. 5, n. 762, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40064->



016-2480-2. Acessado em: Jan. 2023.

AMORIM, D. P. L. Bioplásticos: benefícios sustentáveis e ascensão da produção. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 98-112, jan. 2019.

ARMENTANO, I. *et al.* Nanocomposites Based on Biodegradable Polymers. **Materials**, [s. l.], v. 11, n. 5, 15 May 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma11050795>. Acessado em: Nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **Perfil 2019**. 2019. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2019/>. Acessado em: Set. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **Perfil 2020**. 2020. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2020/>. Acessado em: Set. 2021.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

AWASTHI, S. K. *et al.* A comprehensive review on recent advancements in biodegradation and sustainable management of biopolymers. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 307, 15 Aug. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119600>. Acessado em: Jan. 2023.

BENN, N.; ZITOMER, D. Pretreatment and Anaerobic Co-digestion of Selected PHB and PLA Bioplastics. **Front. Environ. Sci.**, Milwaukee, v. 5, n. 93, Jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00093>. Acessado em: Jan. 2023.

BEUKELAER, H. *et al.* Overview of the mechanical, thermal and barrier properties of biobased and/or biodegradable thermoplastic materials. **Polymer Testing**, [s. l.], v. 116, Dec. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107803>. Acessado em: Nov. 2022.

BOONLUKSIRI, Y.; PRAPAGDEE, B.; SOMBATSOMPOP, N. Promotion of polylactic acid biodegradation by a combined addition of PLA-degrading bacterium and nitrogen source under submerged and soil burial conditions. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 188, June 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109562>. Acessado em: Jan. 2023.

BRITO, G. F. *et al.* Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 127-139, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289427889_Biopolimeros_polimeros_biodegradaveis_e_polimeros_verdes. Acessado em: Jan. 2023.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2018.

CARDOSO, R. S. *et al.* Uso de SAD no apoio à decisão na destinação de resíduos plásticos e gestão de materiais. **Pesquisa operacional**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 67-95, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-74382009000100004>. Acessado em: Jan. 2023.

CASTRO, T. H. M. **Os bioplásticos: impactos ambientais e perspectivas de mercado**. 83 f. 2019. Dissertação (Mestrado Planejamento Estratégico) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.



CAZAUDEHORE, G. *et al.* Impact of mechanical and thermo-chemical pretreatments to enhance anaerobic digestion of poly(lactic acid). **Chemosphere**, [s. l.], v. 297, Jun 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133986>. Acessado em: Jan. 2023.

COSTA, A. R. M. *et al.* Properties of Biodegradable Films Based on Poly(butylene Succinate) (PBS) and Poly(butylene Adipate-co-Terephthalate) (PBAT) Blends. **Polymers**, v. 12, n. 10, 10 Oct. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym12102317>. Acessado em: Nov. 2022.

COSTA, H. M.; RAMOS, V. D.; CYRINO, J. S. A. E. Influência do óleo de semente de uva na degradação termo-oxidativa do polipropileno (PP) reciclado. **Revista Matéria**, Nova Friburgo, v. 26, n. 1, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350031644_Influencia_do_oleo_de_semente_de_uva_na_degradacao_termo-oxidativa_do_polipropileno_PP_reciclado. Acessado em: Jan. 2023.

DEDIEU, I. *et al.* The thermo-mechanical recyclability potential of biodegradable biopolyesters: Perspectives and limits for food packaging application. **Polymer Testing**, [s. l.], v. 111, July 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107620>. Acessado em: Nov. 2022.

DEY, S.; TRIBEDI, P. Microbial functional diversity plays an important role in the degradation of polyhydroxybutyrate (PHB) in soil. **Biotech**, [s. l.], v. 8, n. 171, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1201-7>. Acessado em: Jan. 2023.

DOMINGOS, E. *et al.* Monitorando a degradação da poliamida 11 (PA-11) via espectroscopia na região do infravermelho médio com transformada de fourier (FTIR). **Polímeros**, [s. l.], v. 23, n. 1, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282012005000070>. Acessado em: Nov. 2022.

DONNER, M.; GOHIER, R.; VRIES, H. A new circular business model typology for creating value from agro-waste. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 716, 10 May 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137065>. Acessado em: Nov. 2022.

FERNANDES, M. *et al.* Factors affecting polyhydroxyalkanoates biodegradation in soil. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 182, Dec. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109408>. Acessado em: Jan. 2023.

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. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/27598>. Acessado em: Mai. 2021.

GONÇALVES, C. K. **Pirólise e combustão de resíduos plásticos**. 74 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

HARPER, C. A.; PETRIE, E.M. **Plastics materials and process: a concise encyclopedia**. New Jersey: John Willey & Sons. Inc., 2003.

HOFFMAN, L. S. D. *et al.* The rate of biodegradation of PHA bioplastics in the marine environment: A meta-study. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 142, May 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.020>. Acessado em: Jan. 2023.



INNOCENTNI-MEI, L. H.; MARIANI, P. D. S. C. **Visão Geral Sobre Polímeros ou Plásticos Ambientalmente Biodegradáveis PADs**. Campinas: [s. n.], 2005. Disponível em: https://www.feq.unicamp.br/images/stories/documentos/dtp_edps.pdf. Acessado em: Nov. 2022.

KALOGIROU, C. *et al.* Assessing the Time Dependence of AOPs on the Surface Properties of Polylactic Acid. **Journal of Polymers and the Environment**, [s. l.], v. 31, p. 345-357, Oct. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.04.003>. Acessado em: Jan. 2023.

KOSTALD J. J. *et al.* Assessment of anaerobic degradation of Ingeo™ polylactides under accelerated landfill conditions. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 97, n. 7, p. 1131-1141, July 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.04.003>. Acessado em: Jan. 2023.

LOMBARDO, P. C.; POLI, A. L.; SCHMITT, C. C. Influência de estabilizantes na degradação foto-oxidativa de filmes de compósitos de SWy-1/poli(óxido de etileno). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [s. l.], v. 25, n. 1, P. 101-108, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1604>. Acessado em: Nov. 2022.

LOPES, M. S. G. **Produção de plásticos biodegradáveis utilizando hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana de açúcar**. 128f. 2010. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Instituto Butantan, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LORITE, G. S. *et al.* Evaluation of physicochemical/microbial properties and life cycle assessment (LCA) of PLA-based nanocomposite active packaging. **LWT**, [s. l.], v. 75, p. 305-315, Jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.004>. Acessado em: Jan. 2023.

MACHADO, L. C. M. **Estudo das Propriedades Mecânicas e Térmicas do Polímero Biodegradável Poli-3-Hidroxitirato (PHB) e de Compósitos PHB/Pó de Madeira**. 2008. 134f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MARAVEAS, C. Production of Sustainable and Biodegradable Polymers from Agricultural Waste. **Polymers**, [s. l.], v. 12. n. 5, 14 May 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym12051127>. Acessado em: Nov. 2022.

MEIRELES, C. S. **Síntese e caracterização de membranas de acetato de celulose, obtido do bagaço de cana de açúcar, e blendas de acetato de celulose com poliestireno de copos plásticos descartados**. 80f. 2007. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

MONTORO, S. R. *et al.* Redução da Massa Molecular e Funcionalização do Poli(3-Hidroxitirato-co-3-Hidroxitirato) (PHBV) Via Hidrólise Ácida e Transesterificação com Glicóis. **Polímeros**, Lorena, v.21, n.3, p. 182-187, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282011005000044>. Acessado em: Jan. 2023

NASCIMENTO, K. R. F.; SANTOS, M. R. R.; SILVA, J. A. Biodegradable bags: Sustainability and production's increased. **Diversitas Journal**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 171-189, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.48017/dj.v7i1.1929>. Acessado em: Nov. 2022.



PARK, S. L. *et al.* Isolation of Microbulbifer sp. SOL66 with High Polyhydroxyalkanoate-Degrading Activity from the Marine Environment. **Polymers**, [s. l.], v. 13, n. 23, 30 Nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym13234257>. Acessado em: Nov. 2022.

RAHEEM, D. Application of plastics and paper as food packaging materials - an overview. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 177-188, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i3.11509>. Acessado em: Nov. 2022.

RAHEEM, D. Application of plastics and paper as food packaging materials - an overview. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 177-188, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i3.11509>. Acessado em: Nov. 2022.

RAY, S. S.; BOUSMINA, M. Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In Greening the 21st century materials world. **Progress in Materials Science**, [s. l.], v. 50, n. 8, p. 962-1079, Nov. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.05.002>. Acessado em: Nov. 2022.

RODOLFO JUNIOR, A.; MEI, L. H. I. Mecanismos de Degradação e Estabilização Térmica do PVC. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 263-275, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282007000300018>. Acessado em: Jan. 2023.

SAMITTHIWETCHARONG, S. *et al.* Anaerobic biodegradation of polylactic acid under mesophilic condition using thermal-alkaline pretreatment. **Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 222, n. 2, 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/222/1/012009/meta>. Acessado em: Jan. 2023.

SAMITTHIWETCHARONG, S.; CHAVALPARIT, O. Enhancement of methane production from alkaline pretreated poly (lactic acid) waste by the co-digestion process. **Geomate Journal**, [s. l.], v. 16, n. 56, p. 171-176, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/222/1/012009/meta>. Acessado em: Jan. 2023.

SCHLEMMER, D. **Preparação, caracterização e degradação de blendas de poliestireno e amido termoplástico usando glicerol e óleo de buriti (*mauritia flexuosa*) como plastificantes**. 94f. 2007. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Nacional de Brasília, Brasília, 2007.

SECRETARIA ESPECIAL DE COMUNICAÇÃO SOCIAL. Embaixada do Brasil em Tóquio. **Estudo de mercado – Bioplásticos**. 2007. Disponível em: <https://sistemas.mre.gov.br/kitweb/datafiles/Toquio/pt-br/file/Bioplásticos07.pdf>. Acessado em: Set. 2021.

SILVA, A. L. P. *et al.* Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 405, 1 Feb. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126683>. Acessado em: Nov. 2022.

SONG, Y. *et al.* Cold Oxygen Plasma Treatments for the Improvement of the Physicochemical and Biodegradable Properties of Polylactic Acid Films for Food Packaging. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 81, n. 1, p. E86-E96, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13172>. Acessado em: Jan. 2023.



SOUZA, A. F. *et al.* Biobased polyesters and other polymers from 2,5-furandicarboxylic acid: a tribute to furan excellency. **Polymer Chemistry**, [s. l.], v. 6, n. 33, p. 5961-5983, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C5PY00686D>. Acessado em: Nov. 2022.

SPRAICAR, M.; HORVAT, P.; KRZAN, A. Biopolymers and bioplastics: plastics aligned with nature. **National Institute of Chemistry**, Ljubljana, 2012.

TELLES, M. R.; SARAN, L. M.; UNÊDA-TREVISOLLI, S. H. Produção, propriedades e aplicações de bioplástico obtido a partir da cana de açúcar. **Ciência & Tecnologia**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 52-63, 2011. Disponível em: <https://citec.fatecjab.edu.br/index.php/citec/article/view/65>. Acessado em: Set. 2020.

THOMAS, S. *et al.* Thermal, mechanical and biodegradation studies of biofiller based poly-3-hydroxybutyrate biocomposites. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 155, p. 1373-1384, July 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.11.112>. Acessado em: Jan. 2023.

TOKIWA, Y. *et al.* Biodegradability of Plastics. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 3722-3742, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms10093722>. Acessado em: Nov. 2022.

VENKITESHWARAN, K. *et al.* Methane yield and lag correlate with bacterial community shift following bioplastic anaerobic co-digestion. **Bioresource Technology Reports**, [s. l.], v. 7, Sept. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100198>. Acessado em: Jan. 2023.

XIAO, L. *et al.* Poly (Lactic Acid)-Based Biomaterials: Synthesis, Modification and Applications. **Biomedical Science, Engineering and Technology**, Londres, 2012. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/26368>. Acessado em: Nov. 2022.

YASIN, N. M.; AKKERMANS, S.; IMPE, J. F. M. Enhancing the biodegradation of (bio)plastic through pretreatments: A critical review. **Waste Management**, [s. l.], v. 150, p. 1-12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.004>. Acessado em: Jan. 2023.

ZOBOROWSKA, M. *et al.* Multi-faceted analysis of thermophilic anaerobic biodegradation of poly (lactic acid)-based material. **Waste Management**, [s. l.], v. 155, p. 40-52, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.031>. Acessado em: Jan. 2023.