

Identificação e avaliação de fatores determinantes do processo de compostagem de materiais biodegradáveis: uma revisão sistemática.

Identification and evaluation of determining factors in the composting process of biodegradable materials: a systematic review.

Identificación y evaluación de factores determinantes en el proceso de compostaje de materiales biodegradables: una revisión sistemática.

Marcos Vinícius da Luz

Acadêmico, UNICENTRO, Brasil.
marcosvinidaluz@gmail.com

Carlos Casturino Bueno da Silva Cruz

Mestrando, PPGESA, Brasil.
carlosbuenoambiental@gmail.com

Tatiane Bonametti Veiga

Professora Doutora, UNICENTRO, Brasil.
tatianeveiga@unicentro.br

RESUMO

O uso massificado de materiais plásticos nas últimas décadas, especialmente as embalagens de uso único, tem originado diversos impactos ambientais devido a lenta degradação. Visando reduzir e, posteriormente, substituir os materiais plásticos não biodegradáveis, muitas pesquisas têm sido realizadas para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis nas últimas décadas. O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma revisão integrativa da literatura, por meio de critérios previamente estabelecidos. Para a busca de potenciais estudos escolheu-se as bases de dados bibliográficas eletrônicas *Science Direct (Elsevier)*, *Scientific Electronic Library Online (Scielo)* e *Web of Science (Clarivate Analytics)*. Os termos de busca empregados foram *Composting*, *Extruded*, *Starch-based foams*, *Biodegradable polymers* e *Biodegradable materials*, e as pesquisas foram realizadas no Resumo ou *abstract*. Determinou-se que seriam utilizados apenas publicações em revista na forma de artigos científicos, compreendendo o período: 01/01/2010 a 31/12/2020. A escolha do termo de busca *Composting and Starch-based foams* e a escolha da base de dados *Scielo*, mostraram-se não ser adequadas para o objetivo do presente trabalho, visto que não foram encontrados resultados durante a etapa de busca. As ferramentas de busca disponíveis na base de dados *Web of Science* proporcionaram uma pesquisa mais consistente, por permitir a adição de mais condicionantes na busca. A partir da síntese e análise de estudos elegíveis considerados no presente trabalho, as propriedades mecânicas, a adição de agentes de reforço e a biodegradabilidade dos materiais, são condicionantes que recebem grande protagonismo e estão diretamente interligadas.

PALAVRAS-CHAVE: Compostagem, materiais biodegradáveis, polímeros biodegradáveis, revisão da literatura.

ABSTRACT

The mass use of plastic materials in last decades, especially single-use packaging, has caused several environmental impacts due to slow degradation. In order to reduce and subsequently replace non-biodegradable plastic materials, many researches have been carried out for the development of biodegradable materials in recent decades. The present work aims to develop an integrative literature review, using previously established criteria. To search for potential studies, these electronic bibliographic databases were chosen: Science Direct (Elsevier), Scientific Electronic Library Online (Scielo) and Web of Science (Clarivate Analytics). The research terms used were Composting, Extruded, Starch-based foams, Biodegradable polymers and Biodegradable materials, and the searches were carried out in the abstract. It was determined that only journal publications in the form of scientific articles would be used, covering the period: 01/01/2010 to 12/31/2020. The choice of the search term Composting and Starch-based foams and the choice of the Scielo database, proved not to be adequate for the purpose of the present work, since no results were found during the research stage. The search tools available in the Web of Science database provided a more consistent search, by allowing the addition of more conditions in the search. From the synthesis and analysis of eligible studies considered in the present work, the mechanical properties, the addition of reinforcing agents and the biodegradability of the materials, are conditions that receive great prominence and are directly interconnected.

KEY WORDS: Composting, Biodegradable materials, Biodegradable polymers, Literature review

ABSTRACTO

El uso masivo de materiales plásticos en las últimas décadas, especialmente los envases de un solo uso, ha causado varios impactos ambientales debido a la lenta degradación. Con el fin de reducir y posteriormente reemplazar los materiales plásticos no biodegradables, se han llevado a cabo muchas investigaciones para el desarrollo de materiales biodegradables en las últimas décadas. El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una revisión integradora de la literatura, a través de criterios previamente establecidos. Para la búsqueda de estudios potenciales se eligieron las bases de datos bibliográficas electrónicas Science Direct (Elsevier), Scientific Electronic Library Online (Scielo) y Web of Science (Clarivate Analytics). Los términos de búsqueda empleados fueron Composting, Extruded, Starch-based foams, Biodegradable polymers e Biodegradable materials, y la investigación realizada en abstracto o abstract. Se determinó que sólo se utilizarían publicaciones en revistas en forma de artículos científicos, que comprende el período: 01/01/2010 al 31/12/2020. La elección del término de búsqueda Compostaje y espumas a base de almidón y la elección de la base de datos Scielo, no fueron adecuados para el objetivo del presente estudio, no se encontraron resultados durante la etapa de búsqueda. Las herramientas de búsqueda disponibles en la base de datos Web of Science proporcionaron una búsqueda más consistente, para permitir la adición de más restricciones en la búsqueda. A partir de la síntesis y análisis de los estudios elegibles considerados en el presente estudio, las propiedades mecánicas, la adición de agentes de refuerzo y la biodegradabilidad de los materiales, son restricciones que reciben gran protagonismo y están directamente interconectadas.

PALABRAS CLAVE: Compostaje, materiales biodegradables, polímeros biodegradables, revisión de la literatura.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as consequências inerentes ao desenvolvimento tecnológico e ao crescimento exponencial das sociedades, questões relacionadas aos resíduos recebem grande protagonismo, caracterizando-se como uma das maiores problemáticas atuais.

No Brasil, no ano de 2020, foram gerados aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos, com geração *per capita* de 1,07 kg de resíduo diariamente (390 kg/hab/ano). Deste montante, foram coletados aproximadamente 76,1 milhões de toneladas (76.079.836 t/ano), correspondendo a aproximadamente 92,2% do total gerado de resíduos; resultando em 6.397.464 milhões de toneladas de resíduos não coletados. Dos resíduos coletados, quase 40% não foram destinados adequadamente em aterros sanitários, sendo dispostos incorretamente em lixões e *in natura*. (ABRELPE, 2021).

Os plásticos são polímeros obtidos do processamento do petróleo e gás natural, os quais possuem características diversas, grande versatilidade e aplicabilidade (MICHAELI *et al.*, 2018). Os materiais plásticos representam uma parcela significativa dos RSU gerados diariamente nas sociedades, estando presentes em diversas formas, como embalagens e na composição de inúmeros produtos. No ano de 2020 os plásticos representaram 16,8% da composição gravimétrica dos RSU, com aproximadamente 13,35 milhões de toneladas de plásticos descartados (ABRELPE, 2020).

O emprego massificado dos materiais plásticos, nas últimas décadas, que aliado a uma baixa destinação adequada destes resíduos, configurou-se como um grave problema ambiental, devido à degradabilidade extremamente reduzida *in natura* (MOHANTY; MISRA; HINRICHSEN, 2000; ROBERTSON, 2008). Vale ressaltar, que os plásticos são considerados matérias passíveis de reciclagem, mas assim como em suma maioria dos países, o Brasil não possui índices satisfatórios de reaproveitamento e reciclagem deste material (ABRELPE, 2021).

A elaboração de políticas públicas, tal como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 e regulamentada pelo Decreto nº 10.936 de janeiro de 2022 (BRASIL, 2010; BRASIL, 2022), são fundamentais para um gerenciamento adequado dos resíduos, a fim de minimizar os impactos ao meio ambiente e a saúde da população.

Tais adversidades relacionadas aos resíduos plásticos, especialmente aqueles de uso único, influenciam diretamente na pesquisa e no desenvolvimento de soluções mais adequadas, como por exemplo, os materiais biodegradáveis (ZHOU; SONG; PARKER, 2007; TOKIWA *et al.*, 2009; CHOLLET *et al.*, 2019; VARTIAINEN; VÄHÄ-NISSI; HARLIN, 2014). O desenvolvimento de polímeros biodegradáveis vem se intensificando nas últimas décadas, os quais tem se mostrado uma alternativa muito promissora, com estudos inovadores sendo realizados com foco na comercialização nos setores de embalagens. Dentre os muitos biopolímeros, os materiais a base de amido recebem grande protagonismo (VALAPA; PUGAZHENTHI; KATIYAR, 2016; OKSMAN; SKRIFVARS; SELIN, 2003; SESSINI *et al.*, 2019).

O amido é produzido pela quase totalidade das espécies vegetais verdes, utilizado como principal forma de armazenamento energético, sobre forma de polissacarídeo, encontrados em elevadas concentrações em estruturas reprodutivas como grãos de cereais. Esse material apresenta baixo custo e é facilmente degradado pela ação de microrganismos (ANGLÈS & DUFRESNE, 2000; MUTHURAJ; MISRA; MOHANTY, 2017).

Elevados custos de produção, propriedades mecânicas insatisfatórias e alta sensibilidade à água, são alguns exemplos de fatores limitantes para o uso massificado dos biopolímeros. No entanto, inúmeros estudos vêm sendo desenvolvidos com objetivo de contornar estas limitações, tal como a mistura e processamento simultâneo de diferentes tipos de materiais, podendo ser agentes de reforço, compatibilizadores, plastificadores, fitocompostos, polímeros não biodegradáveis, dentre outros (ARRIETA *et al.*, 2017; SESSINI *et al.*, 2019; BHASNEY *et al.*, 2019; KHAN *et al.*, 2016). Os biopolímeros apresentam características próximas aos materiais plásticos a base de petróleo; mas sofrem degradação pela ação de microrganismos, sendo por isso, passíveis de técnicas de tratamento e reaproveitamento, como a compostagem (IOVINO *et al.*, 2008; KALE *et al.*, 2007; KALITA *et al.*, 2019).

A técnica de compostagem, considerada uma alternativa relativamente simples e eficiente, que a partir da ação de microrganismos em um determinado resíduo, resulta em um substrato ambientalmente e sanitariamente adequado, que pode ser empregado, por exemplo, como insumo para o cultivo de plantas. No processo de compostagem, a degradação aeróbica da matéria orgânica presente no composto, ocorre devido a ação de microrganismos (principalmente bactérias, fungos e actinomicetos), que liberam dióxido de carbono e água; tendo como produto gerado, um composto estável e sanitariamente seguro (CAMPITELLI; VELASCO; CEPPI, 2012; DOMÍNGUEZ; EDWARDS; SUBLER, 1997; KIEHL, 1985). Conforme a NBR 13.591, publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a compostagem consiste no processo de decomposição biológica da matéria orgânica, em condições controladas que incluem as fases de degradação ativa e de maturação (ABNT, 1996).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Identificar e avaliar fatores determinantes da biodegradação, por meio do processo de compostagem, de materiais biodegradáveis a partir da revisão sistemática da literatura.

2.2. Objetivo Específico

Promover a revisão sistemática da literatura, de modo imparcial e reprodutível, para identificar e analisar o resultado de estudos na área sobre os materiais no processo de compostagem.

3. METODOLOGIA

Empregou-se a metodologia de revisão integrativa da literatura para o desenvolvimento da pesquisa. Utilizou-se para condução da revisão sistemática, um processo imparcial e reprodutível para obter e avaliar os resultados encontrados na literatura. A fim de analisar, reunir e comparar os resultados obtidos, definiu-se os critérios da pesquisa, sendo as bases de dados bibliográficas eletrônicas, idioma, data de publicação e demais os critérios de elegibilidade e exclusão.

Para a busca de potenciais estudos escolheu-se as bases de dados bibliográficas eletrônicas *Science Direct* (Elsevier), *Scientific Electronic Library Online* (SciELO) e *Web of Science* (*Clarivate Analytics*), sendo definido como delimitação de objetivo e área de estudo, a degradabilidade de materiais biodegradáveis, por meio do método de compostagem.

Os descritores escolhidos para a pesquisa estão destacados na Figura 1. Os termos utilizados na busca foram separados pelos operadores booleanos, *AND* e *OR*, os quais são usados para associação e adição de termos na pesquisa, respectivamente. Os termos foram traduzidos para o idioma inglês e as pesquisas foram realizadas no resumo ou *abstract* (resumo em inglês), visto que há mais publicações neste idioma nas bases de dados escolhidas.

Figura 1 - Descritores utilizados na revisão integrativa da literatura.

Termo de busca – Português:	Termo de busca – Inglês:
Compostagem	<i>Composting</i>
Extrudados	<i>Extruded</i>
Espumas a base de amido	<i>Starch-based foams</i>
Polímeros biodegradáveis	<i>Biodegradable polymers</i>
Materiais biodegradáveis	<i>Biodegradable materials</i>

Fonte: Elaborado pelos autores.

Determinou-se que seriam utilizados apenas publicações em revista na forma de artigos científicos, com um intervalo de 10 anos, compreendendo o período: 01/01/2010 a 31/12/2020. Excluí-se os trabalhos de revisão sistemática da literatura, dentre outras categorias; materiais publicados em livros ou demais meios, em idiomas e períodos não correspondentes, bem como estudos encontrados em mais de uma base de dados. Os resultados obtidos neste levantamento foram organizados e dispostos em uma planilha eletrônica do *software Excel*, onde adicionou-se o título do artigo e seus respectivos termos de busca, base de dados onde o material foi encontrado, referência e ano de publicação.

Os estudos potencialmente elegíveis foram separados e realizou-se a leitura do título e do resumo, a fim de verificar sua relação com o tema da pesquisa, sendo mantidos os materiais que atendiam o critério anterior, para a leitura e análise completa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após definidos os critérios para seleção dos artigos, foi iniciada a etapa de buscas de potenciais resultados. Pesquisando pelos termos de busca de maneira isolada, encontrou-se inúmeros artigos, sendo realizada a leitura de alguns estudos de modo aleatório, os quais demonstraram a correlação dos termos de busca estabelecidos, para com a temática deste estudo; porém como o objetivo deste estudo foi avaliar a biodegradação de compostos, por meio do método de compostagem, para realizar as pesquisas, associou-se os termos *Biodegradable Materials*, *Biodegradable polymers*, *Starch-based foams* e *Extruded* com o termo *Composting*.

Os artigos foram selecionados de modo totalmente aleatório, escolhendo cinco possíveis artigos indicados nos resultados de cada base de dados, para posterior leitura do resumo e aprovação ou reprovação com base nos critérios adotados. Após realizada a leitura parcial, os artigos aprovados foram selecionados para leitura completa. Repetiu-se o procedimento de escolha aleatória até a seleção de 20 artigos. O número de artigos encontrados em cada base de dados, segundo os termos de busca, estão destacados na Figura 2.

Figura 2 - Quadro de relação entre os artigos elegidos e termos de busca nas respectivas bases de dados.

Termo de Busca:	Número de artigos encontrados por base de dados:			
	<i>Science Direct:</i>	<i>Web of Science:</i>	<i>Scielo:</i>	TOTAL:
<i>Composting and Extruded</i>	02	02	0	04
<i>Composting and Starch-based foams</i>	0	0	0	0
<i>Composting and Biodegradable Materials</i>	01	02	0	03
<i>Composting and Biodegradable Polymers</i>	06	07	0	13
TOTAL:	09	11	0	20

Fonte: Elaborado pelos autores.

Não foram encontrados artigos na base de dados *Scielo*, a partir da utilização da associação dos termos de busca e critérios determinados. Foram encontrados um número significativo de artigos que atendiam os critérios de elegibilidade estabelecidos na base de dados *Web of Science*, mas estes não estavam disponíveis integralmente para leitura. Na base de dados *Science Direct*, encontrou-se uma maior dificuldade na pesquisa dos artigos, devido a uma limitação nas ferramentas fornecidas para a busca, o que resultou em muitos artigos que continham apenas parte dos termos de busca associados.

A associação dos termos de busca *Composting* e *Starch-based foams* resultaram em apenas uma referência encontrada na base de dados *Web of Science*; porém esta não atende aos critérios estabelecidos para o período de publicação. Buscando de modo isolado o termo *Starch-based foams*, os resultados indicam que o termo escolhido está relacionado aos materiais alvo deste estudo, os materiais biodegradáveis. Após o levantamento e leitura preliminar, os 20 artigos selecionados foram devidamente separados para análise e leitura completa. Os dados referentes aos artigos selecionados foram organizados em uma planilha eletrônica, utilizando-se do Software Microsoft® Excel®.

Dentre as muitas informações, técnicas e resultados descritos nos 20 trabalhos selecionados, todos abordam a questão da sustentabilidade em temáticas como a geração de resíduos, embalagens plásticas de uso único, impactos ambientais devido a produtos não biodegradáveis, desenvolvimento de biopolímeros a partir de fontes renováveis, metodologias para avaliação e determinação da biodegradação de materiais.

De modo geral, o emprego de aditivos e agentes de reforço naturais ou sintéticos, propriedades mecânicas e biodegradabilidade são características diretamente interligadas e fundamentais para avaliação dos materiais biodegradáveis.

Os materiais plásticos revolucionaram as mais diversas áreas e setores, estando presentes em variadas aplicações, especialmente no setor de embalagens. Estes materiais são encontrados sobre diversas formas e composições, mas em geral sua degradabilidade é extremamente lenta no meio ambiente, que aliado a grande demanda, consumo e descarte inadequado, resulta em um massivo impacto ambiental (MICHAELI *et al.*, 2018; MOHANTY; MISRA; HINRICHSEN, 2000; TOKIWA *et al.*, 2009).

Determinados polímeros biodegradáveis apresentam características semelhantes aos materiais plásticos a base de petróleo (DHAR *et al.*, 2016). Para reduzir o uso massificado de plásticos, especialmente em embalagens de uso único, é de suma importância avaliar as propriedades mecânicas do biopolímeros, a fim de selecionar e direcioná-los às aplicações compatíveis.

A análise de parâmetros como força de resistência a tração (σ), módulo de Young, alongamento total (ϵ), alongamento para o estresse máximo da tração (E), dentre outros, indicam a biodegradação e a integridade do material sobre estresse que pode ocorrer durante a produção, manuseio e utilização. Ressalta-se a importância destas análises, pois a mistura de polissacarídeos, tal como o amido, com polímeros sintéticos não funcionais, origina agrupamentos, em outras palavras, uma baixa homogeneidade entre os compostos nas misturas, o que afeta diretamente as propriedades mecânicas, resultando em misturas com maior fragilidade (VIEYRA *et al.*, 2015; HUERTA *et al.*, 2019, RHIM *et al.*, 2006).

Nessa revisão, pode-se observar que os estudos desenvolvidos por Kalita *et al.* (2020a); Kalita *et al.* (2020b); Castellani *et al.* (2016); Weng, Wang, Wang (2011); Sintim *et al.* (2020); Adamcová *et al.* (2016); Bandini *et al.* (2020); Aguirre *et al.* (2017); Aguirre *et al.* (2018) e Taiatele *et al.* (2019) não realizaram análises das propriedades mecânicas dos compostos empregados em suas pesquisas.

As pesquisas e desenvolvimento dos polímeros biodegradáveis como substitutos dos plásticos a base de petróleo, visam não só a biodegradabilidade, mas também propriedades mecânicas semelhantes, custos de produção acessíveis e resistência a agentes externos, principalmente à água. A mistura e processamento simultâneo dos biopolímeros com diferentes tipos de materiais, tal como os agentes de reforço, compatibilizadores, plastificadores, polímeros não biodegradáveis, dentre outros aditivos, são exemplos de técnicas encontradas para contornar algumas das limitações e melhorar as propriedades dos biopolímeros (ARRIETA *et al.*, 2017; SESSINI *et al.*, 2019; BHASNEY *et al.*, 2019; KHAN *et al.*, 2016; ANGLÈS; DUFRESNE, 2000, ZHOU; SONG; PARKER, 2007; PUSHPADASS *et al.*, 2008; WILLETT; SHOGREN, 2002).

O processamento simultâneo de biopolímeros com agentes de reforço, sobre a forma de nanopartículas (como exemplo as nanoargilas - *nanoclays*) e nanofiladores (celulose microcristalina), pode ser uma interessante alternativa para melhorar as qualidades finais dos polímeros biodegradáveis (FORTUNATI *et al.*, 2014). Assim como método de processamento utilizado, a influência das nanopartículas sobre o processo de biodegradação, é diretamente relacionada com a afinidade com água e sua dispersão nos compostos, afetando diretamente a qualidade final dos materiais (YANG *et al.*, 2015).

Outra variedade de aditivos para os polímeros biodegradáveis que também tem ganhado relevância, são os compostos naturais, utilizados como substâncias funcionais (KIRSCHWENG *et al.*, 2017; HUSSAIN; TAUSIF; ASHRAF, 2015). Dentre as características de determinados compostos de origem vegetal, como as propriedades antimicrobianas, quando incorporados a polímeros, podem afetar negativamente nos processos de biodegradação (BROZIO; MASEK, 2020).

A mistura e coprocessamento dos biopolímeros com plásticos a base de petróleo são alternativas muito promissoras, pois podem reduzir a quantidade de polímeros não biodegradável produzidos e descartados, obtendo-se compostos com uma ampla gama de propriedades, além de reduzir o custo dos polímeros biodegradáveis, visto que o custo produção desse material ainda é um fator limitante para seu uso massificado (ARRIETA *et al.*, 2017; BHASNEY *et al.*, 2019; LEJA; LEWANDOWICZ, 2010).

Como materiais alvo dos estudos escolhidos, observou-se mais trabalhos empregando o poliácido láctico (*Polylactic acid – PLA*), mas sendo empregados também, compostos como *Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxy-valerate)* (PHBV), *Thermoplastic flour* (TPF), *Poly-caprolacton* (PCL), *Poly(1,4-Butylene) Succinate* (PBS), *Triethylene Succinate* (TES), *Thermoplastic Starch* (TPS), *Polybutylene adipate terephthalate* (PBAT), *Polyhydroxy-butyrate* (PHB), *High Density Polyethylene* (HDPE), *Ethylene-vinyl acetate* (EVA), *Linear Low Density Polyethylene* (LLDPE), *Starch-based bioplastic* (SBB), *Poly-hydroxyalkanoate* (PHA).

Como aditivos, ou agentes de reforço, foram empregados *Metallocceno Polyethylene* (mPE), *Lignin nanoparticles* (LNPs), *Polybutylene adipate terephthalate* (PBAT), *Cellulose Nanocrystals* (CNC), *Organo-modified montmorillonite* (OMMT) e *Quaternary ammonium compound* (QAC), *Cloisite-Na+*, *Microcrystalline cellulose* (MCC), *Nanofibrillated cellulose* (NFC), *Deep Eutectic Solvents* (DES), β -caroteno, Juglone, Morin, Curcumina, e *Birch Bark Extract*. Ressalta-se que, entre os estudos analisados, os autores Weng *et al.* (2011); Hosni, Pittman e Robson (2019); Sintim *et al.* (2020); Bandini *et al.* (2020); Aguirre *et al.* (2017) e Taiatele *et al.* (2019) não empregaram aditivos ou agentes de reforço em seus estudos.

As informações referentes a composição dos polímeros, uso de aditivos e agentes de reforço, breves resultados e método de avaliação da biodegradação, utilizados nos trabalhos está descrito na Figura 3.

Figura 3 - Quadro comparativo entre os resultados dos compostos e aditivos utilizados artigos selecionados.

Compostos estudados	Aditivos ou agente de reforço	Resultados	Referência
PHBV	-----	Os resultados indicam elevada biodegradabilidade para todos os compostos PHBV (uma variante de PHA) analisados no processo de compostagem.	Weng, Wang e Wang (2011)
TPF	mPE	Com a maior proporção de TPF nas amostras, maior a biodegradação. A mistura é parcialmente biodegradável.	Vieyra <i>et al.</i> (2015)
	Anidrido maleico		
PLA	LNPs	A adição de uma pequena fração (1%) de LNPs parece dificultar a biodegradação da matriz PLA, mas a mistura ainda é totalmente biodegradável.	Yang <i>et al</i> (2015)
PCL	-----	Ambas as amostras apresentaram elevada biodegradabilidade, 92,1% e 82,9% respectivamente, em 20 dias de compostagem.	Castellani <i>et al</i> (2016)
PLA	PBAT	A misturas se degradaram mais lentamente, precisando de mais tempo de compostagem (46 dias) – 79,0% de biodegradação.	
<i>Starch</i>	-----	Ambas as amostras foram facilmente biodegradadas, apresentando elevada erosão durante os ensaios de compostagem.	Adamcová <i>et al</i> (2016)
PCL/ <i>Starch</i>			
PLA	-----	A ação de biodegradação dos microrganismos e a mineralização aumentam conforme o peso molecular do PLA diminuiu.	Aguirre <i>et al</i> (2017)
PLA	-----	A ação de biodegradação dos microrganismos e a mineralização aumentam conforme o peso molecular do PLA diminuiu.	Aguirre <i>et al</i> (2017)
PBS/TES	CNC	A adição de CNC foi positiva na melhora do desempenho mecânico das amostras; porém impactou na redução da taxa de biodegradação das misturas.	Fortunati <i>et al</i> (2017)
PLA	OMMT; QAC	Todos os compostos são degradados pela ação dos microrganismos, com a amostra PLA/QAC (0,4%) apresentando a maior produção de gás carbônico, ou seja, maior biodegradação.	Aguirre <i>et al</i> (2018)
TPS/PLA	-----	Todas as misturas são suscetíveis a ação dos microrganismos, com as amostras de TPS/PLA e PBAT/TPS apresentando as maiores taxa de biodegradação durante a compostagem.	Taiatele <i>et al</i> (2019)
TPS/PVA			
PBAT			
PCL	-----	Todas as amostras testas apresentaram elevada taxa de biodegradação, como o PCL demonstrando uma degradação mais rápida.	Hosni, Pittman e Robson (2019).
PHB			
PLA			
PBS			
HDPE/PLA	-----	A adição de 15% de PLA resultou em redução de vida de cerca de 60% do HDPE, através da fragilização da estrutura do HDPE causada pela degradação do PLA. A mistura é parcialmente biodegradável.	Huerta <i>et al</i> (2019)

EVA/TPS	Cloisite-Na+	A mistura EVA/TPS é parcialmente biodegradável, apresentando redução na taxa de biodegradação do TPS presente na amostra quando comparado com o TPS puro.	Sessini <i>et al</i> (2019)
PLA/LLDPE	MCC	O aumento na concentração de MCC acelera a taxa biodegradação, mas apenas os compostos PLA e MCC foram degradadas (mistura parcialmente biodegradável).	Kalita et al (2020a)
PBS	MCC; NFC	As amostras apresentaram elevada taxa de biodegradação. A adição de NFC e/ou MCC na matriz PBS, acelera o processo de biodegradação das misturas.	Platnieks et al (2020)
PLA/PCL	MCC	A maior concentração de MCC acelera o processo de biodegradação das amostras. A mistura é totalmente biodegradável.	Kalita et al (2020b)
SBB	-----	A degradação dos compostos de PLA foi muito baixa durante degradação anaeróbica, já o SBB apresentou elevada taxa de biodegradação.	Bandini <i>et al</i> (2020)
PLA			
(PBAT/Starch)	-----	Todas as amostras apresentam elevada biodegradação durante a compostagem. A amostra PLA/PHA possui a maior taxa de biodegradação nos ensaios de compostagem.	Sintim <i>et al</i> (2020)
(PBAT/Starch)			
(PBAT/PLA)			
PLA/PHA			
PBS/PLA	DES	A adição do aditivo DES aumenta a taxa de degradação das amostras, além de melhorar ligeiramente as propriedades mecânicas. As misturas são totalmente biodegradáveis.	Delamarche <i>et al</i> (2020)
PLA	β-caroteno Juglone; Morin; Curcumina	A adição de fitoquímicos não afeta significativamente, apenas dificultando levemente a biodegradação. As misturas são totalmente biodegradáveis.	Brozio e Masek (2020)
PHA			
PBAT	<i>Birch Bark Extract</i>	A adição de apenas 1% do aditivo BBE na matriz PBAT, reduz a taxa de biodegradação das amostras, mas ainda sim sendo totalmente biodegradável.	Kirsh <i>et al</i> (2020)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para os ensaios de biodegradação dos compostos foram utilizados o método de compostagem aeróbica e anaeróbica, em ambientes controlados, no solo e em sistema simulado de compostagem; onde foi adicionado resíduos e substâncias variadas, com os substratos devendo apresentar elevada carga orgânica, tal como turfa, bioresíduo sintético (serragem, comida de coelho, amido, açúcar, óleo e ureia), adubo comercial, húmus, ácidos húmicos, chorume de cavalo, estrume, resíduos de frango e resíduos de quintal (gramas e folhas) (BROZIO; MASEK, 2020; HUERTA *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2015; VIEYRA *et al.*, 2015; SINTIM *et al.*, 2020).

A ação dos microrganismos sobre um determinado material pode ser aproximadamente mensurado a partir da avaliação gravimétrica gradual, pois no processo de biodegradação uma fração do material é convertido em água, dióxido de carbono e demais

substâncias, resultando na redução no peso do material. Outra maneira de avaliar a taxa de degradação dos materiais poliméricos é a alteração de coloração, a qual está relacionada ao início do processo de biodegradabilidade e a fragilização (YANG *et al.*, 2015). Cabe ressaltar que a eficiência do processo de degradação depende também das dimensões do material alvo (BROZIO; MASEK, 2020). Dentre as metodologias adotadas pelos autores dos artigos considerados, destaca-se a técnica de avaliação da biodegradação com base na redução de peso, a qual encontra-se em 15 dos 20 artigos selecionados (75% do total), seguido pela avaliação visual, quantificação do dióxido de carbono produzido e seguido quantificação do gás metano produzido, estando presentes em 07 (35%), 06 (30%) e 01 (5%) artigos respectivamente. Cabe ressaltar que também houve a utilização conjunta de metodologias. A determinação da biodegradação de compostos pode ser determinada com maior acurácia por meio de análises baseadas na medição das emissões do dióxido de carbono e/ou no consumo oxigênio pelos microrganismos degradantes em condições de compostagem controladas (BARRENA *et al.*, 2011; KALITA *et al.*, 2020a).

5. CONCLUSÃO

A escolha do termo de busca *Composting and Starch-based foams* mostrou não ser adequado para o objetivo do presente trabalho, visto que não foram encontrados resultados durante a etapa de busca.

As ferramentas de busca disponíveis nas bases de dados Scielo e *Web of Science* proporcionaram uma pesquisa mais consistente, por permitir a adição de mais condicionantes na busca. Com base nas informações obtidas na etapa de busca, a base de dados Scielo mostrou-se não ser adequada à busca referências sobre a biodegradação, por meio do processo de compostagem, de materiais biodegradáveis, visto que não foram apresentados estudos. Nos anos de 2019 e 2020 foram encontrados maior número de artigos considerados na presente pesquisa, evidenciando o aumento do interesse da comunidade científica em abordar esta temática.

A partir da análise completa dos trabalhos pode-se concluir que a adição de aditivos e agentes de reforço, o método de processamento para a obtenção dos materiais biodegradáveis, características do material tais como a dimensão, peso molecular e rugosidade, assim como características relacionadas ao substrato utilizado, como a umidade, relação de C/N, teor de matéria orgânica e temperatura são fatores e condições que afetam diretamente as propriedades e a biodegradabilidade das amostras, evidenciado pelos resultados dos processos de compostagem desenvolvidos nos artigos considerados para esta pesquisa, o quais empregaram diferentes substratos e metodologias de análise.

Dentre as desvantagens apresentadas por alguns autores, os custos mais elevados atrelados as etapas de produção dos materiais biodegradáveis representam um fator limitante para seu uso massificado. A mistura e coprocessamento com materiais não biodegradáveis, como os próprios plásticos, torna-se uma opção muito interessante para reduzir custos e melhorar o desempenho mecânico das amostras, uma vez que reduz a quantidade de material plástico não biodegradável necessário na sua produção. Os testes de biodegradabilidade em meio de compostagem realizados por autores que utilizaram este conceito, indicam uma biodegradabilidade parcial das amostras, onde o plástico residual não biodegradável encontra-

se fragilizado pela ação dos microrganismos que atuaram sobre o material, estando com dimensões reduzidas, o que pode diminuir o tempo necessário para sua degradação total.

Conforme as pesquisas consideradas, os materiais biodegradáveis sem aditivos testados apresentaram elevadas taxas de biodegradação, sendo muito suscetíveis a ação dos microrganismos nos ensaios de compostagem, evidenciado pelos materiais biodegradáveis puros utilizados como controle analítico. Visando aumentar a resistência a ação dos microrganismos, o tempo de vida dos materiais biodegradáveis e melhorar o desempenho mecânico das amostras, muitos autores empregaram aditivos e agentes de reforço, os quais, nas quantidades adequadas, influenciam diretamente na degradação das amostras, dificultando a degradação do material, mas no mesmo preservando a biodegradabilidade total da amostra, evidenciado pelos materiais residuais encontrados ao final dos ensaios de compostagem, sugerindo tempos de compostagem mais longos.

Ademais, o desenvolvimento de materiais com qualidades mecânicas adequadas e passíveis de biodegradação, seja a partir de materiais totalmente ou parcialmente biodegradáveis é uma alternativa muito promissora para a redução dos plásticos no meio, especialmente aqueles de uso único, com os resultados obtidos pelo presente estudo, demonstrando a possibilidade de uso de determinados tipos de compostos biodegradáveis, além de ressaltar a necessidade da realização de mais pesquisas e trabalhos, para difundir a utilização destes materiais sendo mais economicamente e ambientalmente viáveis.

6. AGRADECIMENTOS

A Fundação Araucária, pelo apoio financeiro, através da bolsa concedida para a realização desta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**: 2020. São Paulo: Abrelpe, 1. ed., 2020.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**: 2021. São Paulo: Abrelpe, 1. ed., 2021.
- ADAMCOVÁ, D.; VAVERKOVÁ, M. D.; MAĽÍČEK, T.; BŘOUĽKOVÁ, E. Analysis of biodegradability of degradable/biodegradable plastic material in controlled composting environment. **Journal Of Ecological Engineering**, 17(4), 1-10, 2016.
- AGUIRRE, E. C.; AURAS, R.; SELKE, S.; RUBINO, M.; MARSH, T. Enhancing the biodegradation rate of poly(lactic acid) films and PLA bio-nanocomposites in simulated composting through bioaugmentation. **Polymer Degradation And Stability**, 154(1), 46 - 54, 2018.
- AGUIRRE, E. C.; AURAS, R.; SELKE, S.; RUBINO, M.; MARSH, T. Insights on the aerobic biodegradation of polymers by analysis of evolved carbon dioxide in simulated composting conditions. **Polymer Degradation And Stability**, 137(1), 271 - 271, 2017.
- ANASTASI, A.; VARESE, G. C.; MARCHISIO, V. F. Isolation and identification of fungal communities in compost and vermicompost. **Mycologia**, 97(1), 33-44, 2005.
- ANGLÈS, M. N.; DUFRESNE, A. Plasticized Starch/Tunicin Whiskers Nanocomposites. 1. Structural Analysis. **Macromolecules**, 33(22), 8344-8353, 2000.

ARJMANDI, R.; HASSAN, A.; EICHHORN, S. J.; HAAFIZ, M. K. M.; ZAKARIA, Z.; TANJUNG, F. A. Enhanced ductility and tensile properties of hybrid montmorillonite/cellulose nanowhiskers reinforced polylactic acid nanocomposites. **Journal Of Materials Science**, 50(8), 3118-3130, 2015.

ARRIETA, M.; SAMPER, M.; ALDAS, M.; LÓPEZ, J. On the Use of PLA-PHB Blends for Sustainable Food Packaging Applications. **Materials**, 10(9), 1008, 2017.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.591: Compostagem - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

BANDINI, F.; FRACHE, A.; FERRARINI, A.; TASKIN, E.; COCCONCELLI, P. S.; PUGLISI, E. Fate of Biodegradable Polymers Under Industrial Conditions for Anaerobic Digestion and Aerobic Composting of Food Waste. **Journal Of Polymers And The Environment**, 28(9), 2539-2550, 2020.

BARRENA, R.; GEA, T.; PONSÁ, S.; RUGGIERI, L.; ARTOLA, A.; FONT, X.; SÁNCHEZ, A. Categorizing Raw Organic Material Biodegradability Via Respiration Activity Measurement: a review. **Compost Science & Utilization**, 19(2), 105-113, 2011.

BHASNEY, S. M.; BHAGABATI, P.; KUMAR, A.; KATIYAR, V. Morphology and crystalline characteristics of polylactic acid [PLA]/linear low density polyethylene [LLDPE]/microcrystalline cellulose [MCC] fiber composite. **Composites Science And Technology**, 171(1), 54-61, 2019.

BRASIL. Decreto n. 10936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**. Brasília, 12 de janeiro de 2022.

BRASIL. Lei n. 12305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**. Brasília, 03 de agosto de 2010.

BROZIO, M. L.; MASEK, A. The Effect of Natural Additives on the Composting Properties of Aliphatic Polyesters. **Polymers**, 12(9), 1856, 2020.

CASTELLANI, F.; ESPOSITO, A.; STANZIONE, V.; ALTIERI, R. Measuring the Biodegradability of Plastic Polymers in Olive-Mill Waste Compost with an Experimental Apparatus. **Advances In Materials Science And Engineering**, 2016(1), 1-7, 2016.

CAMPITELLI, P.; VELASCO, M.; CEPPI, S. Characterization of humic acids derived from rabbit manure treated by composting-vermicomposting process. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 12(4), 875-891, 2012.

CHOLLET, B.; CUESTA, J. M. L.; LAOUTID, F.; FERRY, L. Lignin Nanoparticles as A Promising Way for Enhancing Lignin Flame Retardant Effect in Polylactide. **Materials**, 12(13), 2132, 2019.

DELAMARCHE, E.; MATTLET, A.; LIVI, S.; GÉRARD, J.; BAYARD, R.; MASSARDIER, V. Tailoring Biodegradability of Poly(Butylene Succinate)/Poly(Lactic Acid) Blends With a Deep Eutectic Solvent. **Frontiers In Materials**, 7(7), 13, 2020.

DHAR, P.; BHASNEY, S. M.; KUMAR, A.; KATIYAR, V. Acid functionalized cellulose nanocrystals and its effect on mechanical, thermal, crystallization and surfaces properties of poly (lactic acid) bionanocomposites films: a comprehensive study. **Polymer**, 101, 75-92, 2016.

DOMÍNGUEZ, J.; EDWARDS, C.A.; SUBLER, S. A comparison of composting and vermicomposting. **Biocycle**, 38(4), 57-59, 1997.

FORTUNATI, E.; GIGLI, M.; LUZI, F.; DOMINICI, F.; LOTTI, N.; GAZZANO, M.; CANO, A.; CHIRALT, A.; MUNARI, A.; KENNY, J. M.; ARMENTANO, I.; TORRE, L. Processing and characterization of nanocomposite based on poly(butylene/triethylene succinate) copolymers and cellulose nanocrystals. **Carbohydrate Polymers**, 165(1), 51-60, 2017.

FORTUNATI, E.; RINALDI, S.; PELTZER, M.; BLOISE, N.; VISAI, L.; ARMENTANO, I.; JIMÉNEZ, A.; LATTERINI, L.; KENNY, J. M. Nano-biocomposite films with modified cellulose nanocrystals and synthesized silver nanoparticles. **Carbohydrate Polymers**, 101(1), 1122-1133, 2014.

HOSNI, A. S. A.; PITTMAN, J. K.; ROBSON, G. D. Microbial degradation of four biodegradable polymers in soil and compost demonstrating polycaprolactone as an ideal compostable plastic. **Waste Management**, 97(1), 105-114, 2019.

HUERTA, A. M. T.; CRESPO, M. A. D.; RAMIREZ, D. P.; VELA, A. L. F.; ALVAREZ, E. C.; LOPEZ, D. A. Preparation and Degradation Study of HDPE/PLA Polymer blends for Packaging applications. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, 18(1), 251-271, 2019.

HUSSAIN, T.; TAUSIF, M.; ASHRAF, M. A review of progress in the dyeing of eco-friendly aliphatic polyester-based polylactic acid fabrics. **Journal Of Cleaner Production**, 8(1), 476-483, 2015.

IOVINO, R.; ZULLO, R.; RAO, M. A.; CASSAR, L.; Gianfreda, L. Biodegradation of poly(lactic acid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions. **Polymer Degradation And Stability**, 93(1), 147-157, 2008.

KALE, G.; AURAS, R.; SINGH, S. P.; NARAYAN, R. Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. **Polymer Testing**, 26(8), 1049-1061, 2007.

KALITA, N. K.; NAGAR, M. K.; MUDENUR, C.; KALAMDHAD, A.; KATIYAR, V. Biodegradation of modified Poly(lactic acid) based biocomposite films under thermophilic composting conditions. **Polymer Testing**, 76(1), 522-536, 2019.

KALITA, N. K.; BHASNEY, S. M.; KALAMDHAD, A.; KATIYAR, V. Biodegradable kinetics and behavior of bio-based polyblends under simulated aerobic composting conditions. **Journal Of Environmental Management**, 261(1), 110211, 2020a.

KALITA, N. K.; BHASNEY, S. M.; MUDENUR, C.; KALAMDHAD, A.; KATIYAR, V. End-of-life evaluation and biodegradation of Poly(lactic acid) (PLA)/Polycaprolactone (PCL)/Microcrystalline cellulose (MCC) polyblends under composting conditions. **Chemosphere**, 247, 125875, 2020b.

KHAN, B.; NIAZI, M. B. K.; SAMIN, G.; JAHAN, Z. Thermoplastic Starch: a possible biodegradable food packaging material-a review. **Journal Of Food Process Engineering**, 40(3), 12447-12447, 2016.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1. ed., 1985.

KIRSH, I.; FROLOVA, Y.; BEZNAEVA, O.; BANNIKOVA, O.; GUBANOVA, M.; TVERITNIKOVA, I.; ROMANOVA, V.; FILINSKAYA, Y. Influence of the Ultrasonic Treatment on the Properties of Polybutylene Adipate Terephthalate, Modified by Antimicrobial Additive. **Polymers**, 12(10), 2412, 2020.

KIRSCHWENG, B.; TÁTRAALJAI, D.; FÖLDES, E.; PUKÁNSZKY, B. Natural antioxidants as stabilizers for polymers. **Polymer Degradation And Stability**, 145(1), 25-40, 2017.

LEJA, K.; LEWANDOWICZ, G. Polymers Biodegradation and Biodegradable Polymers: a review. **Polish Journal Of Environmental Studies**, 19(2), 255-266, 2010.

MICHAELI, W.; GREIF, H.; KAUFMAN, H.; VOSSEBÜRGER, F. **Tecnologia dos plásticos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1. ed., 1995.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. **Macromolecular Materials And Engineering**, 276-277(1), 1-24, 2000.

MUTHURAJ, R.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: a literature review. **Journal of Applied Polymer Science**, 135(24), 45726, 2017.

OKSMAN, K.; SKRIFVARS, M.; SELIN, J. F. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. **Composites Science and Technology**, 63(9), 1317-1324, 2003.

PLATNIEKS, O.; GAIDUKOV, S.; BARKANE, A.; SEREDA, A.; GAIDUKOVA, G.; GRASE, L.; THAKUR, V. K.; FILIPOVA, I.; FRIDRIHSONE, V.; SKUTE, M.; LAKA, M. Bio-Based Poly(butylene succinate)/Microcrystalline Cellulose/Nanofibrillated Cellulose-Based Sustainable Polymer Composites: thermo-mechanical and biodegradation studies. **Polymers**, 12(7), 1472, 2020.

PUSHPADASS, H. A.; BABU, G. S.; WEBER, R. W.; HANNA, M. A. Extrusion of starch-based loose-fill packaging foams: effects of temperature, moisture and talc on physical properties. **Packaging Technology And Science**, 21(3), 171-183, 2008.

RHIM, J. W.; MOHANTY, A. K.; SINGH, S. P.; NG, P. K. W. Effect of the processing methods on the performance of polylactide films: thermocompression versus solvent casting. **Journal Of Applied Polymer Science**, 101(6), 3736-3742, 2006.

ROBERTSON, G. State-of-the-art biobased food packaging materials. *In: Environmentally Compatible Food Packaging*. [S.l.]: Elsevier Inc., 2008. 3-28.

SHAH, A. A.; HASAN, F.; HAMEED, A.; AHMED, S. Biological degradation of plastics: a comprehensive review. **Biotechnology Advances**, 26(3), 246-265, 2008.

SESSINI, V.; ARRIETA, M. P.; RAQUEZ, J. M.; DUBOIS, P.; KENNY, J. M.; PEPONI, L. Thermal and composting degradation of EVA/Thermoplastic starch blends and their nanocomposites. **Polymer Degradation And Stability**, 159, 184-198, 2019.

SINTIM, H. Y.; BARY, A. I.; HAYES, D. G.; WADSWORTH, L. C.; ANUNCIADO, M. B.; ENGLISH, M. E.; BANDOPADHYAY, S.; SCHAEFFER, S. M.; DEBRUYN, J. M.; MILES, C. A.; REGANOLD, J. P.; FLURY, M. In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils. **Science Of The Total Environment**, 727, 138668, 2020.

TAIATELE, I.; BOSCO, T. C.; FARIA-TISCHER, P. C. S.; BILCK, A. P.; YAMASHITA, F.; BERTOZZI, J.; MICHELS, R. N.; MALI, S. Abiotic Hydrolysis and Compostability of Blends Based on Cassava Starch and Biodegradable Polymers. **Journal Of Polymers And The Environment**, 27(11), 2577-2587, 2019.

TOKIWA, Y.; CALABIA, B.; UGWU, C.; AIBA, S. Biodegradability of Plastics. **International Journal Of Molecular Sciences**, 10(9), 3722-3742, 2009.

VALAPA, R.; PUGAZHENTHI, G.; KATIYAR, V. Hydrolytic degradation behaviour of sucrose palmitate reinforced poly(lactic acid) nanocomposites. **International Journal of Biological Macromolecules**, 89, 70-80, 2016.

VARTIAINEN, J.; VÄHÄ-NISSI, M.; HARLIN, A. Biopolymer Films and Coatings in Packaging Applications - A Review of Recent Developments. **Materials Sciences and Applications**, 5(10), 708-718, 2014.

VIEYRA, H.; MARTÍNEZ, E. S. M.; JUÁREZ, E.; LÓPEZ, U. F.; MÉNDEZ, M. A. A. Biodegradation process of a blend of thermoplastic unripe banana flour-polyethylene under composting: identification of the biodegrading agent. **Journal Of Applied Polymer Science**, 132(29), 0-10, 2015.

WENG, Y. X.; WANG, X. L.; WANG, Y. Z. Biodegradation behavior of PHAs with different chemical structures under controlled composting conditions. **Polymer Testing**, 30(4), 372-380, 2011. Disponível em:

WILLETT, J.L.; SHOGREN, R. L. Processing and properties of extruded starch/polymer foams. **Polymer**, 43(22), 5935-5947, 2002.

YANG, W.; FORTUNATI, E.; DOMINICI, F.; KENNY, J. M.; PUGLIA, D. Effect of processing conditions and lignin content on thermal, mechanical and degradative behavior of lignin nanoparticles/polylactic (acid) bionanocomposites prepared by melt extrusion and solvent casting. **European Polymer Journal**, 71(1), 126-139, 2015.

ZHOU J.; SONG, J.; PARKER, R. Microwave-assisted moulding using expandable extruded pellets from wheat flours and starch. **Carbohydrate Polymers**, 69(3), 445-454, 2007.