

Estudo da biodegradação do Poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT) com óleo essencial de manjerição exótico em lodo anaeróbio)

Study of biodegradation of Poly(butylene adipate co-terephthalate) (PBAT) with exotic basil essential oil in anaerobic sludge

Estudio de biodegradación de Poli(co-tereftalato de adipato de butileno) (PBAT) con aceite esencial de albahaca exótica en lodo anaerobio

Recebido: 13/06/2022 | Revisado: 20/06/2022 | Aceito: 24/06/2022 | Publicado: 20/07/2022

Renan Rogério Oliveira de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4833-059X>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: renan.rogerio@ufpe.br

Gisely Alves da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1076-4691>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: gisely.alves@ufpe.br

João Gabriel Machado de Avellar

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-9675>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: joao.avellar@ufpe.br

Maria Los Angeles Perez Fernandez Palha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-1999>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: maria.palha@ufpe.br

Glória Maria Vinhas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5073-609X>

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

E-mail: gloria.vinhas@ufpe.br

Resumo

O presente artigo teve como objetivo avaliar a biodegradação de filmes de Poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT) e PBAT aditivado com óleo essencial de manjerição exótico (OEM), usando o filme de polietileno como amostra padrão, por um período de 15 meses por digestão anaeróbia, em lodo proveniente de Estação de Tratamento de Esgoto. A evolução da degradação dos filmes foi quantificada através da perda de massa e de espessura ao longo do tempo. Também foi avaliado a viabilidade das Bactérias Produtoras de Ácido, Bactérias Anaeróbias Heterotróficas, *Pseudomonas aeruginosa* e Bactérias Aeróbias Heterotróficas. Quanto à variação de massa, o filme de polietileno não apresentou variação significativa, enquanto os filmes de PBAT, com e sem óleo essencial de manjerição exótico, apresentaram variação. A variação de espessura mostrou-se estatisticamente nula para os filmes de polietileno e PBAT puro, enquanto os de PBAT/OEM exibiu uma pequena perda. Em relação aos micro-organismos presentes no lodo, inicialmente o lodo apresentou baixa carga microbiana e, com o passar do tempo, foi constatado o crescimento de micro-organismos aeróbios no meio. Ao final do experimento, verificou-se a presença majoritária de Bactérias Aeróbias Heterotróficas. Como também foi possível inferir que os filmes de PBAT, assim como o PBAT/OEM sofreram perda de massa como indicio de degradação dos filmes, ao longo do tempo de exposição no lodo, com destaque para o filme aditivado com OEM.

Palavras-chave: Polímeros biodegradáveis; PBAT; Óleo essencial de manjerição exótico.

Abstract

This paper aimed to evaluate the biodegradation of Poly(butylene adipate terephthalate) (PBAT) films and PBAT with exotic basil essential oil (OME), using the polyethylene film as a standard sample, for a period of 15 months by anaerobic digestion, in sludge from wastewater treatment plant. The evolution of the degradation of the films was quantified through the loss of mass and thickness over time and the viability of Acid Producing Bacteria, Heterotrophic Anaerobic Bacteria, *Pseudomonas aeruginosa* and Heterotrophic Aerobic Bacteria was also evaluated. As for the mass variation, polyethylene films showed no significant variation, while PBAT films, with and without exotic basil essential oil, showed variation. The thickness variation was statistically null for polyethylene and pure PBAT films, while PBAT/OME exhibited a small loss. Regarding the microorganisms present in the sludge, initially

the sludge exhibited low microbial load and, over time, the growth of aerobic microorganisms in the medium was observed. At the end of the experiment, the presence of mostly Heterotrophic Aerobic Bacteria was verified. It was also possible to infer that the films of PBAT, as well as PBAT/OME suffered mass loss as an indication of the films degradation, over the time of exposure in the sludge, especially the film with OME additive.

Keywords: Biodegradable polymers; PBAT; Exotic basil essential oil.

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo evaluar la biodegradación de películas Poli(co-tereftalato de adipato de butileno) (PBAT) y PBAT asociado al aceite esencial de albahaca exótica (AEA), utilizando película de polietileno como muestra padrón, por un periodo de 15 meses por digestión anaerobia, en el lodo proveniente de una planta de tratamiento de efluentes. La evolución de la degradación de las películas fue cuantificada por la pérdida de masa y de espesor con el paso del tiempo. También fue evaluado la viabilidad de las Bacterias Productoras de Ácido, Bacterias Anaerobias Heterótrofas, *Pseudomonas aeruginosa* y Bacterias Aerobias Heterótrofas. Con respecto a la variación de masa, la película de polietileno no presentó variación significativa, ya las películas de PBAT, con y sin aceite de albahaca exótica, presentaron variación. La variación del espesor resultó estadísticamente nula para las películas de polietileno y PBAT puro, ya las de PBAT con aditivos (PBAT/AEA) presentaron una pequeña pérdida. Con relación a los microorganismos presentes en el lodo, inicialmente el lodo presentó una carga microbiana baja y con el paso del tiempo, se constató el crecimiento de microorganismos aerobios en el medio. Al finalizar el experimento, fue observado la presencia mayoritaria de bacterias aerobias heterótrofas. Como también es posible inferir que las películas de PBAT, así como PBAT/AEA sufrieron pérdida de masa con indicación de degradación de las películas con el paso del tiempo de exposición en lodo, con énfasis en la película con aditivos con AEA.

Palabras clave: Polímeros biodegradables; PBAT; Aceite esencial de albahaca exótica.

1. Introdução

A utilização de plásticos transformou a sociedade de muitas formas, haja vista sua inserção nas indústrias de embalagens, eletrônicos, têxteis, automotivas e em equipamentos de segurança; de forma que se encontra presente em inúmeros materiais utilizados no dia a dia (Conceição *et al.*, 2019). O elevado emprego e produção desses insumos ocorrem devido à sua versatilidade: eles são leves, fortes, baratos, duráveis, resistentes à corrosão e têm alta resistência térmica e elétrica (Ahmed *et al.*, 2019).

Conforme a WWF-Brasil (2019), cerca de metade dos poluentes plásticos do mundo foram produzidos nos últimos 20 anos, sendo o Brasil o quarto país maior produtor de lixo plástico do mundo, com 11,3 milhões de toneladas produzidas por ano. Em decorrência desse fato, há uma enorme quantidade de resíduos plásticos sendo descartados no meio ambiente, enquanto apenas por volta de 1,3% dessa quantidade é reciclada no país (Wit *et al.*, 2019). Em todo o mundo, ainda há persistência dos produtos plásticos e seus componentes, aliada ao elevado volume ocupado em aterros e às emissões de gases tóxicos resultante de sua incineração (Lima, J. *et al.*, 2021a). Tendo em vista esse contexto, os acúmulos na natureza são cada vez maiores, que resultam em impactos em diversos ecossistemas, destacando-se o desequilíbrio da vida marítima, o agravamento do efeito estufa e das condições climáticas (Wit *et al.*, 2019).

Para alguns especialistas, a reciclagem seria a solução para esse problema, todavia, desde o início de sua utilização, em 1950, o ritmo da produção desse material aumentou tanto que, mesmo se todo ele tivesse sido reciclado, não haveria tempo para reutilizá-lo. De fato, não se consegue reciclar nem um décimo de todo o plástico que foi produzido desde então (Beegreen, 2019). A necessidade de inovação de materiais alternativos com a finalidade de se adaptar ao panorama de conscientização ambiental, em geral, tem estimulado o interesse em materiais biodegradáveis (Azevedo *et al.*, 2016).

Conforme estabelecido pela ASTM-D-833 (*American Standard for Testing Methods*), os polímeros biodegradáveis são materiais degradáveis, em que a degradação resulta primariamente da ação de microrganismos, tais como fungos, bactérias e algas de ocorrência natural, gerando CO₂, CH₄, componentes celulares e outros produtos (Silva, 2017). Dentre eles, destaca-se o polibutileno adipato co-tereftalato (PBAT), formado por ácido tereftálico, ácido adípico e 1,4-butanodiol, o qual possui ligações ésteres, conferindo uma maior facilidade para degradação (Souza, 2019).

Ressaltando a aplicação desses polímeros como embalagens, estas podem agir apenas como uma barreira física,

denominadas de convencionais, ou podem interagir com o produto para incrementar ou conservar suas propriedades, sendo intituladas de ativas. As embalagens ativas possuem um aditivo que migra da formulação das embalagens e são aplicadas a fim de melhorar a qualidade, preservação e segurança dos produtos comercializados, através da manutenção da umidade, sequestro de oxigênio, controle de temperatura ou liberação controlada de produtos químicos com ação microbiana (Moraes Filho, 2020). Dentre estes materiais, os polímeros biodegradáveis usados para obtenção de filmes aditivados com substâncias naturais, como óleos essenciais, têm sido utilizados para desenvolver embalagens ativas com propriedades antimicrobianas (Souza, 2022). Esse tipo de embalagem ativa pode ser fabricado com adição do princípio ativo na composição do polímero ou em uma camada na superfície interna da embalagem (Heras-Mozos *et al.*, 2019).

Comumente, os óleos essenciais possuem atividade antioxidante, ação larvicida e antimicrobiana, de forma que são estudadas suas aplicações para combater patógenos alimentares. Tais óleos são preferíveis em detrimento de aditivos químicos, pois os aditivos podem migrar das embalagens e, conseqüentemente, contaminar seu conteúdo (Lima *et al.*, 2021b).

Dentre os polímeros comerciais, o PBAT torna-se um excelente material para ser utilizado em embalagens ativas devido às suas ótimas propriedades mecânicas e térmicas, que o fazem ser capaz de formar filmes (Andrade *et al.*, 2020). Ademais, ao incorporar determinados óleos essenciais em sua estrutura, a depender da proporção utilizada, não há uma variação significativa em suas propriedades, conforme constatado por Lima *et al.* (2021b), que adicionou óleo essencial de laranja em filmes de PBAT e por Souza (2019), que incorporou óleo essencial de manjeriço em filmes de PBAT.

A partir do manjeriço, pode-se extrair óleos com diferentes teores dos componentes que os constituem, a exemplo do óleo de manjeriço verde, óleo de manjeriço exótico e óleo de manjeriço anis, que são capazes de impedir a formação ou o crescimento de colônias de *Escherichia coli*, *Bacillus subtilis* e *Enterobacter aerogenes*. O óleo de manjeriço exótico é composto majoritariamente por estragol (74,6%) e linalol (21,4%) (Souza, 2019).

A capacidade de biodegradação dos filmes poliméricos torna-se uma ferramenta promissora para tratamentos de resíduos plásticos no solo, como compostagem, conforme avaliado por Moraes Filho (2020). Mas, o processo de biodegradação também pode ser induzido por microrganismos presente em sistemas submersos como água do mar e rios, como observado por Barreto *et al.* (2021). Para inovação dessa temática, sistemas como digestores anaeróbios podem ser utilizados para favorecer o processo de biodegradação de filmes poliméricos descartados.

Dado o exposto, este artigo tem como objetivo avaliar a biodegradabilidade do PBAT puro e PBAT aditivado com óleo essencial de manjeriço exótico em condições anaeróbias. Os filmes produzidos foram obtidos utilizando-se as técnicas de extrusão. O acompanhamento da evolução da biodegradação foi avaliado por meio das análises de perda de massa, variação de espessura e quantificação dos micro-organismos presente no meio de fermentação.

2. Metodologia

2.1 Materiais

Polímero PBAT, produzido pela BASF, de nome comercial ECOFLEX® F BLEND C1200. Óleo essencial de manjeriço exótico (OEM) produzido pela Laszlo. Polietileno comercializado pela Sociedade Industrial de Plásticos DAC Ltda.

2.2 Métodos

Toda a pesquisa foi realizada no Laboratório de Microbiologia Industrial localizado no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco.

Os ensaios foram realizados em triplicata, de modo que os resultados a serem expostos são compostos pela média dos

valores e pelos seus respectivos desvios-padrão amostrais.

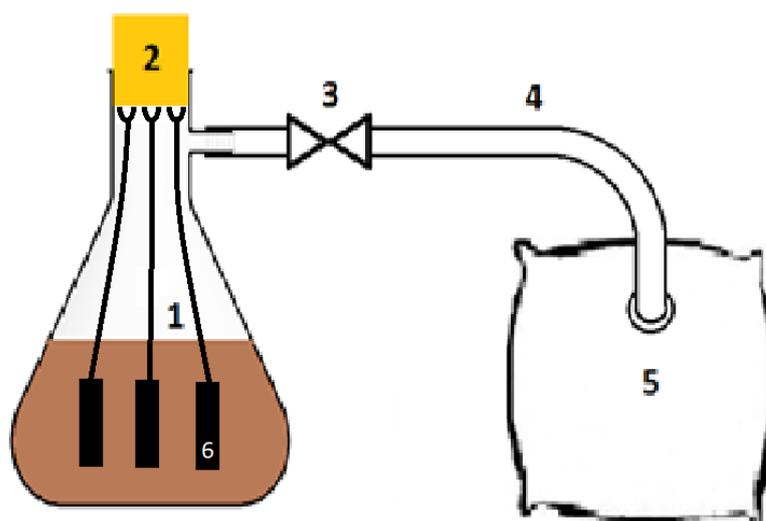
2.2.1 Preparação dos filmes poliméricos

O processamento ocorreu no Processamento de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG/PB. O PBAT puro e PBAT aditivado com óleo de manjerição exótico foram processados em um misturador (marca Rheomix – modelo Rheomix 3000), vinculado a um reômetro de torque System 90 da HaakeBuchler, a 180 °C, com rotores contra rotacionais do tipo roller, a 60 rpm, durante 10 min e com fator de preenchimento de 70%. A elaboração dos filmes poliméricos deu-se pela preparação em uma extrusora monorosca Lab-16 Chill roll AX PLÁSTICOS. A espessura dos filmes de polietileno foi de aproximadamente 5 mm e a dos filmes de PBAT e PBAT/OEM foi de 15 mm.

2.2.2 Preparação dos biodigestores

Para realização do estudo, utilizaram-se kitassatos de vidro com capacidade total de 1000 ml como biodigestores de bancada, nos quais foram acrescentados $800,0 \pm 0,5$ gramas de lodo e conectados a câmaras para armazenamento do gás a ser produzido (Figura 1). As câmaras para o armazenamento do gás foram compostas por bolsas plásticas do fabricante Alfakit. Acoplou-se a cada um biodigestor uma câmara independente.

Figura 1. Sistema de digestão anaeróbia. (1) Kitassato com o meio de fermentação; (2) Rolha de vedação da saída superior; (3) Válvula de segurança; (4) Mangueira condutora do biogás formado no Kitassato a câmara de captação de gás; (5) câmara de captação do gás e (6) filmes poliméricos.



Fonte: Adaptado de Silva (2017).

2.2.3 Variação de massa e espessura

A medição da variação de massa e espessura foi realizada em uma balança analítica da marca CELTAC (modelo FA-2104N) e com um paquímetro (Mitutoyo), respectivamente. Os resultados, em porcentagem de perda de massa ou espessura, foram obtidos através da relação entre os valores iniciais e valores finais obtidos após o tempo de inoculação, por meio da Equação 1.

$$\text{Variação} = \left(\frac{\text{Valor}_{\text{inicial}} - \text{Valor}_{\text{final}}}{\text{Valor}_{\text{inicial}}} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

A cada abertura dos biodigestores, os filmes foram limpos com água destilada em abundância, colocados em placas de Petri e levados para estufa (marca LEEC) a 30 °C por 6h, seguido de 20 minutos em dessecador (marca FANEM - modelo 315SE).

2.2.4 Análise dos micro-organismos presentes no lodo

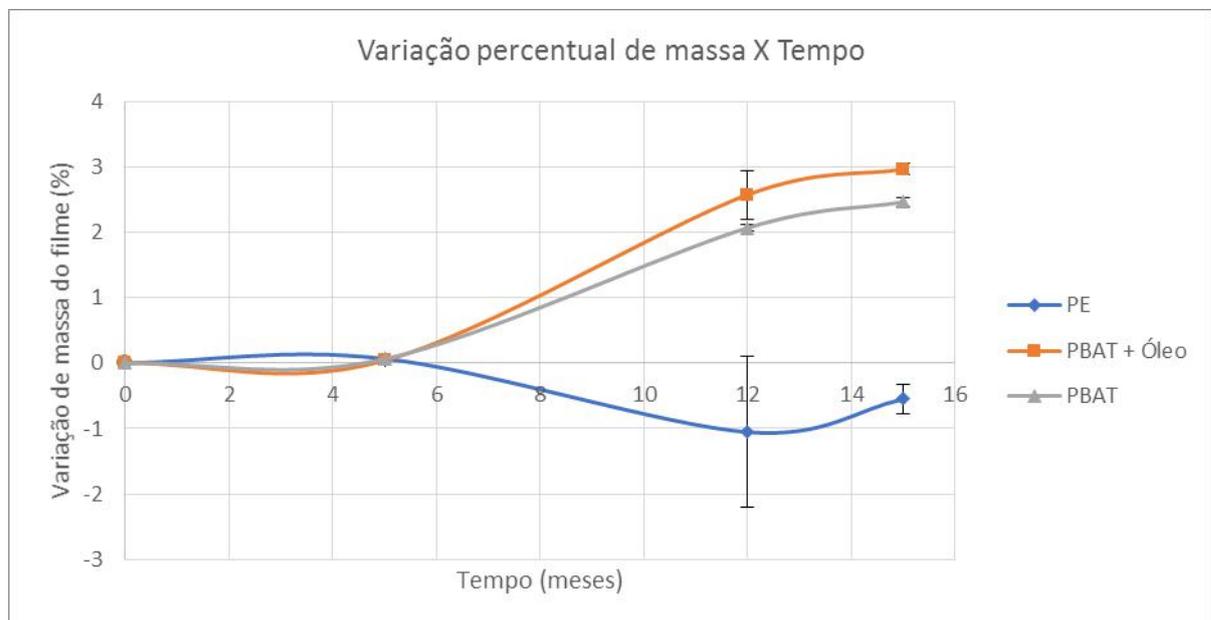
Com objetivo de avaliar a população microbiana no lodo, o qual foi utilizado como inóculo, foram preparados meios de cultura para cinco grupo de bactérias (Aeróbias Heterotróficas, *Pseudomonas aeruginosa* Planctônicas, Produtoras de Ácidos, Anaeróbias Heterotróficas e Redutoras de Sulfato) e um grupo de fungos (Fungos Filamentosos). Para a quantificação dos grupos estudados utilizou-se a técnica dos números mais prováveis (NMP) (Blodgett, 2010).

3. Resultados e Discussão

3.1 Variação de massa e espessura

Os resultados da quantificação de massa são exibidos na Figura 2, em que foi verificado a perda de massa dos filmes de PBAT e PBAT/OEM, enquanto os filmes de polietileno apresentaram um ligeiro ganho de massa.

Figura 2. Variação percentual de massa dos filmes de PE, PBAT e PBAT/OEM ao longo do tempo.



Fonte: Autores (2022).

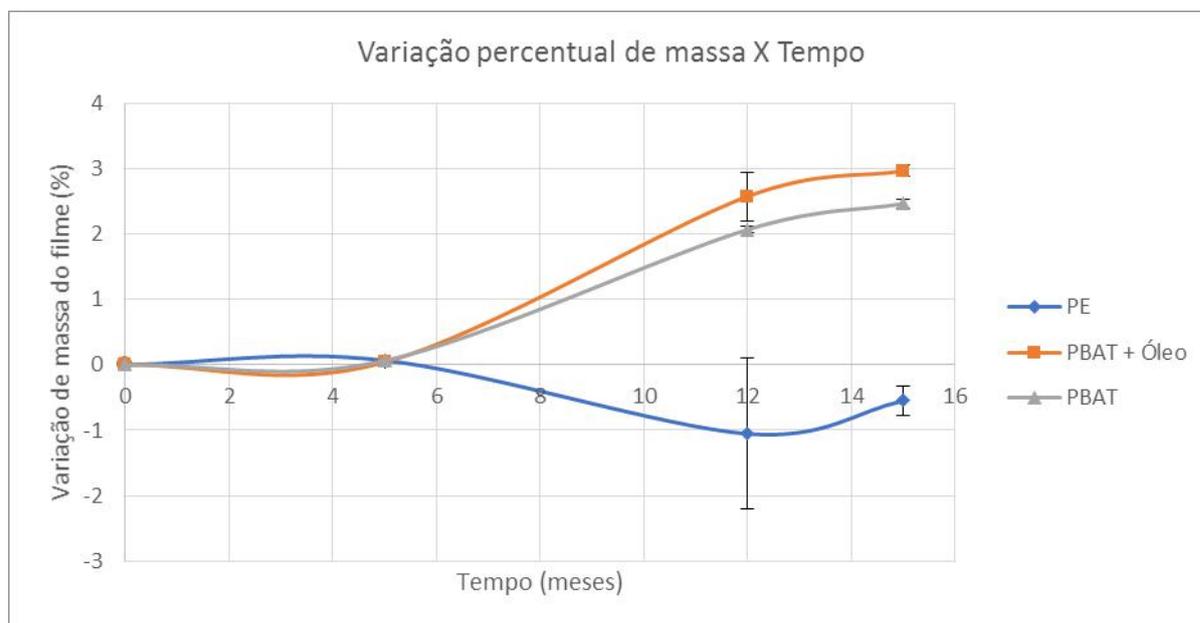
Em relação aos filmes de polietileno (Figura 2), observou-se que não houve perda de massa, mas um pequeno acréscimo no decorrer dos últimos meses. O aumento da massa desses filmes pode ser um indicativo de que o material absorveu umidade do ar atmosférico, devido a um processo de secagem não tão eficiente. Esse fenômeno também foi constatado por Abou-Zeid, et al., (2004) e Gutierrez-Wing *et al.* (2010). Esses últimos autores também verificaram a biodegradação do polietileno em lodo proveniente de esgoto, em regime anaeróbio, e constataram uma variação de massa nula

em um período de 8 meses. Segundo Klein (2010), a dificuldade de ocorrer a degradação do polietileno, em anaerobiose, é causada pelo processo de reticulação, em que são formadas ligações entre as cadeias do polímero. Outro fator que limita a degradação química é sua elevada massa molecular, fase cristalina e hidrofobicidade, que restringem a difusão de compostos no interior do material.

Ambos os filmes de PBAT e PBAT/OEM não apresentaram variação de massa até o quinto mês. Esse fato pode ter ocorrido pela presença do óleo essencial de manjeriço exótico no meio, por possuir características antimicrobianas. Após 12 meses houve uma redução de 2,07% e 2,57% (m/m) e, após 15 meses, a redução de massa atingiu 2,46% e 2,96% (m/m), em relação aos filmes de PBAT e PBAT/OEM, respectivamente. A priori, não é esperado uma maior perda de massa dos filmes aditivados. Todavia, pode-se elucidar essa questão pela migração do óleo essencial para o meio, causado pela sua fluidez. Esse fenômeno também foi observado por Silva *et al.* (2018), cujo óleo essencial analisado migrou do polímero para o meio em um curto período, devido ao mecanismo de difusão.

Em relação a biodegradação, espera-se uma menor variação de massa dos filmes aditivados com óleos essenciais com propriedades antimicrobianas, conforme avaliado por Moraes Filho (2020), em que ao final de 24 semanas de degradação de PBAT puro e com 2% (m/m) de óleo essencial de canela (com propriedades antimicrobianas), em condições aeróbias, observou uma variação de 33% e 21% (m/m), respectivamente, em solo. A degradabilidade do PBAT é favorecida pela grande quantidade de ligações ésteres, de grupos carbonilas e de heteroátomos, que são susceptíveis a ataques químicos e biológicos. Além desses fatores, a linearidade da cadeia também favorece a degradação do composto (Zehetmeyer, 2016). Já o óleo essencial de manjeriço exótico possui características antimicrobianas, repelentes e inseticidas, o que retarda a biodegradação de materiais que são associados a eles (Cunha, 2018). Acerca da variação de espessura, os resultados são ilustrados na Figura 3.

Figura 3. Variação percentual de espessura dos filmes de PE, PBAT e PBAT/OEM ao longo do tempo.



Fonte: Autores (2022).

Tratando da variação de espessura (Figura 3), nos filmes de polietileno, notou-se que não houve variação nos primeiros 12 meses e, nos três meses seguintes, ocorreu um pequeno decréscimo. Contudo, considerando o elevado desvio padrão, que é decorrente da não uniformidade dos filmes, é possível afirmar que estatisticamente não houve variação na

espessura desse filme.

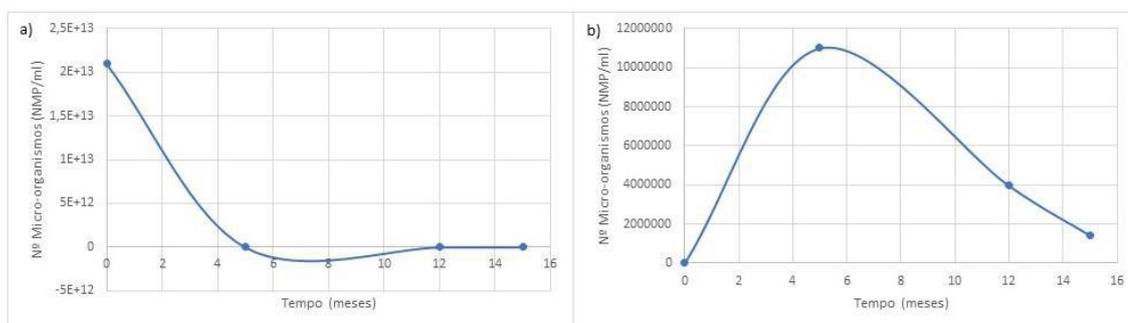
No filme de PBAT puro não houve uma variação de espessura estatisticamente significativa, o que é condizente com os resultados apresentados, tendo em vista que houve uma redução pequena de massa. Já o PBAT associado ao óleo essencial de manjeriço exótico exibiu uma menor espessura em 12 meses, com um decréscimo de 4,85% (m/m), havendo um acréscimo nos três meses seguintes, resultando em um filme 2,87% (m/m) mais espesso que o valor inicial. A perda de espessura pode ter sido causada tanto pela degradação, quanto pelo deslocamento do óleo. Já o posterior acréscimo pode ser explicado pela maior umidade absorvida pelo material.

Ao avaliar filmes poliméricos com espessuras distintas, Gutierrez-Wing *et al.* (2010) verificaram o efeito da espessura do material no processo de digestão anaeróbia. Comparou-se a degradação em filmes de PHB, em que os filmes mais finos (0,24 e 1,2 mm) foram os que exibiram completa degradação em poucos meses. Já os filmes com 5 mm de espessura não foram totalmente consumidos em um período de 8 meses. Dessa forma, uma maior espessura está associada a um maior tempo para a degradação do material, tendo em vista que provoca uma maior resistência para a colonização microbológica no seu interior (Klein, 2010).

3.2 Análise dos micro-organismos presentes no lodo

Os resultados da análise das Bactérias Produtoras de Ácidos e Bactérias Anaeróbias Heterotróficas são exibidos na Figura 4.

Figura 4. Número de (a) Bactérias Produtoras de Ácidos e (b) Bactérias Anaeróbias Heterotróficas no decorrer do tempo.

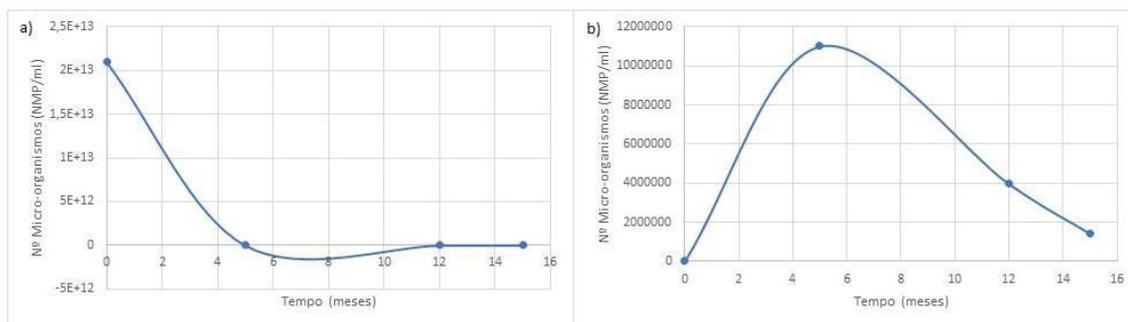


Fonte: Autores (2022).

Inicialmente havia a presença significativa apenas do grupo de Bactérias Produtoras de Ácido (Figura 4a), cuja concentração era na ordem de 10^{13} NMP/ml; e, após o quinto mês, não foi mais constatada a presença desse grupo. Dessa forma, no período que esse grupo de bactérias produzia ácidos orgânicos, foi possível observar o crescimento exponencial das Bactérias Anaeróbias Heterotróficas (Figura 4b), visto que utilizam ácidos orgânicos como substratos, atingindo uma ordem de grandeza de 10^7 NMP/ml. Por fim, iniciaram a fase de declínio e permaneceram presentes em pequena quantidade.

Acerca das *Pseudomonas aeruginosa* Planctônicas e Bactérias Aeróbias Heterotróficas, os resultados são ilustrados na Figura 5.

Figura 5. Número de (a) *Pseudomonas aeruginosa* Planctônicas e (b) Bactérias Aeróbias Heterotróficas no decorrer do tempo.



Fonte: Autores (2022).

Contudo, também foi constatado o crescimento de grupos que utilizam oxigênio para se desenvolverem, indicando que houve infiltração de ar atmosférico no sistema. Observou-se o crescimento das *Pseudomonas aeruginosa* Planctônicas (Figura 5a), atingindo a fase estacionária no quinto mês, com uma concentração na ordem de 10^{14} NMP/ml, e iniciando a fase de declínio em seguida, tornando-se ausentes no décimo segundo mês. Já as Bactérias Aeróbias Heterotróficas (Figura 5b) permaneceram possivelmente na forma de esporos ou em menor quantidade, até o quinto mês. A partir desse período, deduz-se que houve uma quantidade de gás oxigênio mais significativa nos biodigestores, tanto pelo crescimento exponencial desse grupo de bactérias, como pelo declínio do grupo anaeróbico. Ao final do experimento, o grupo das Bactérias Heterotróficas Aeróbias ainda se encontravam em fase de crescimento exponencial, na ordem de grandeza de 10^{20} NMP/ml.

3.3 Relação entre a biodegradação e a análise microbiana do meio

Nos primeiros meses do experimento, dois fatores contribuíram para que não houvesse variação de massa dos filmes. A baixa carga microbiana inicial presente no lodo, que pode ser explicada devido à maior utilização de produtos de limpeza no período da pandemia, haja vista que possuem efeitos antimicrobianos, como abordado por Silva (2018). Nesse mesmo intervalo Lima e Silva (2021) constataram um aumento de produção de 13% desses produtos, como desinfetantes, detergentes, tensoativos e alvejantes. O outro fator foi a migração do óleo essencial de manjeriço para o meio, pois, por causa das suas propriedades antimicrobianas, retardou a reprodução dos micro-organismos, resultado também constatado por Moraes Filho (2020) e Moraes (2006).

Conforme o decorrer do tempo, nota-se um crescimento das *Pseudomonas aeruginosa* e das Bactérias Aeróbias Heterotróficas, indicando que houve infiltração de oxigênio no meio, tornando as condições do meio favoráveis para o crescimento dessas espécies bacterianas. Em seguida, há uma predominância das Bactérias Aeróbias Heterotróficas, atingindo a maior concentração observada nesta pesquisa, que pode ter ocasionado o declínio das outras populações, em razão da competição por nutrientes. Dessa forma, a maior taxa de degradação dos filmes ocorreu no período entre 5 e 12 meses, em que havia uma maior diversidade de micro-organismos no lodo e reduziu-se, ligeiramente, após o domínio das Bactérias Aeróbias Heterotróficas.

Realizando um comparativo com a degradação obtida de outros autores, Moraes Filho (2020) constatou uma variação de massa de 21 e 33% (m/m), em 24 semanas, nos filmes com e sem óleo essencial de canela, respectivamente. Já Wang *et al.* (2015) observaram uma redução de 2,7% de massa em um período de 12 meses. Ambos os autores estudaram a degradação do PBAT em condições reais de solo, em regime aeróbio. Assim, infere-se que os micro-organismos identificados no estudo consumiram preferencialmente os substratos presentes no lodo, em detrimento dos filmes poliméricos.

4. Conclusão

Com base na variação de massa, de espessura e das análises dos micro-organismos, foi possível avaliar a degradação do PE e PBAT, com e sem óleo essencial de manjerição exótico, em lodo proveniente de Estação de Tratamento de Esgoto. Em um período de 15 meses, foi constatado uma maior perda de massa dos filmes de PBAT/OEM, com 2,96% (m/m), em comparação com os filmes de PBAT puro, com 2,46% (m/m), que pode ser explicada devido à migração do óleo essencial para o meio. Já o polietileno não exibiu perda de massa.

Em relação à análise dos micro-organismos, inicialmente havia uma baixa carga microbiana, destacando-se as Bactérias Produtoras de Ácido, que, devido à produção de ácidos orgânicos, favoreceram o crescimento das Bactérias Anaeróbias Heterotróficas. Já ao final do experimento, predominou a presença das Bactérias Aeróbias Heterotróficas. Em nenhum biodigestor foi constatada a presença das Bactérias Redutoras de Sulfato. Dessa forma, é possível concluir que nem a adição do óleo essencial de manjerição exótico ao PBAT, nem o declínio do grupo das bactérias anaeróbias no meio retardaram o processo de biodegradação.

Devido a pandemia e a indisponibilidade de alguns laboratórios, não foi possível analisar alguns parâmetros na presente pesquisa. Dessa maneira, indica-se para futuros trabalhos a inserção de Análise Termogravimétrica (TGA), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Por fim, recomenda-se também a utilização de um sistema de digestão anaeróbia que possua uma melhor vedação, objetivando a conservação das condições anaeróbias do estudo. Garantindo o regime anaeróbio, recomenda-se a quantificação do biogás a ser produzido através da Cromatografia Gasosa (CG).

Referências

- Abou-zeid, D. M., Müller, R. J., & Deckwer, W. D. (2004). Biodegradation of aliphatic homopolyesters and aliphatic-aromatic copolyesters by anaerobic microorganisms. *Biomacromolecules*, 5, 1687–1697. <https://doi.org/10.1021/bm0499334>
- Ahmed, T., Shahid, M., Azeem, F., Rasul, I., Shah, A. A., Noman, M., Hameed, A., Manzoor, N., Manzoor, I., & Muhammad, S. (2018). Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(8), 7287–7298. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>
- Andrade, M. F., Moraes Filho, L. E. P. T., S9ilva, I. D. de L., Lima, J. C. da C., Carvalho, L. H., Almeida, Y. M. B., & Vinhas, G. M. (2020). Influence of Gamma Radiation on the Properties of Biodegradable PBAT – Poly (butylene Adipate co-terephthalate) Active Films with Orange Essential Oil. *Macromolecular Symposia*, 394(1), 2000057. <https://doi.org/10.1002/masy.202000057>
- Azevedo, J., Carvalho, L., Canedo, E., Barbosa, J., & Silva, M. (2016). Avaliação da Biodegradação em Compósitos com Fibras Naturais através de Perda de Massa e Produção de CO₂. *Revista Virtual de Química*, 14(1), 85-98. 10.5935/1984-6835.20160080
- Barreto, L. S., Silva, E. E. G. da., Henrique, M. A., Barbosa, J. D. V., Oliveira, S. H. de., Almeida, Y. M. B. de., & Vinhas, G. M. (2021). Study of biodegradation of Poly(butylene adipate co-terephthalate) (PBAT) by maritime microorganisms from the Atlhantic Coast of Recife-PE (Brazil). *Research, Society and Development*, 10(17), e164101724579. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i17.24579>
- Beegreen. (2019). *Consumo consciente e sustentabilidade: conheça a reciclabilidade dos materiais*. <https://beegreen.eco.br/consumo-consciente-reciclabilidade-dos-materiais/>
- Blodgett, R. (2010). Most Probable Number from Serial Dilutions. Bacteriological Analytical Manual. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-appendix-2-most-probable-number-serial-dilutions>
- Conceição, M. M., Conceição, J. T. P., Dalmas, F. B., & Rosini, A. M. (2019). O plástico como vilão do meio ambiente. *Revista Geociências UNG-Ser*, 18(1). <http://dx.doi.org/10.33947/1981-7428-v18n1-4024>
- Cunha, A. P. da. (2018). Aspectos históricos sobre plantas medicinais, seus constituintes activos e fitoterapia. https://www.ppmac.org/sites/default/files/aspectos_historicos.pdf
- Gutierrez-Wing, M. T., Stevens, B. E., Theegala, C. S., Negulescu, I. I., & Rusch, K. A. (2010). Anaerobic Biodegradation of Polyhydroxybutyrate in Municipal Sewage Sludge. *Journal of Environmental Engineering*, 136(7), 709–718. 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000208
- Heras-Mozos, R., Muriel-Galet, V., López-Carballo, G., Catalá, R., Hernández-Muñoz, P., & Gavara, R. (2018). Development and optimization of antifungal packaging for sliced pan loaf based on garlic as active agent and bread aroma as aroma corrector. *International Journal of Food Microbiology*, 290, 42-48. 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.09.024

- Klein, M. J. (2010). *Avaliação da degradação do polietileno contendo aditivo pró-degradante em diferentes meios de exposição* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Lima, J. C. da C., Brandalise, R. N., Almeida, Y. M. B. de., Melo, T. J. A. de., & Vinhas, G. M. (2021a). Evaluation of the thermal properties of PLA/SEBS blends with moringa subjected to degradation in a marine environment. *Research, Society and Development*, 10(4). <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/13249>. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.13249>
- Lima, J. C. da C., Pereira, J. de C. N., Andrade, M. F. de., Góis, G. da S., Simões, I. T. de A., Silva, M. A. A. D. da., Almeida, Y. M. B. de., & Vinhas, G. M. (2021b). Study and influence of clove, cinnamon, and orange essential oils in the preparation of poly (lactic acid) films: Active packaging development. *Research, Society and Development*, 10(4). <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14340>
- Lima, L. S., & Silva, F. M. (2021). Gerenciamento de estoques durante a pandemia do covid-19 – estudo de caso em uma indústria de produtos para limpeza. *Gestão Contemporânea: Revista de Negócios Cesuca*, 5(6), 1-16.
- Moraes Filho, L. E. P. T. (2020). *Desenvolvimento de filmes ativos de poli(butileno adipato co-tereftalato) (PBAT) e investigação da biodegradação em solo* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
- Morais, T. P. S. (2006). *Produção e composição do óleo essencial de manjeriço (Ocimum basilicum L.) sob doses de cama de frango* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.
- Souza, G. K. M. (2019). *Desenvolvimento e caracterização de filmes de poli(butileno adipato co-tereftalato) aditivados com óleo essencial de manjeriço para aplicação de embalagens ativas* (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
- Souza, A. L. de, Vieira, M. J. A., Paiva, M. J. do A. e, Bittencourt, M. T., Vieira, Érica N. R., & Leite Júnior, B. R. de C. (2022). Antimicrobial biodegradable packaging with nanotechnology application. *Research, Society and Development*, 11(8), e3511830406. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.30406>
- Silva, C., Oliveira, F. S. M., Caetano, V. F., Vinhas, G. M., & Cardoso, S. A. (2018). Orange essential oil as antimicrobial additives in poly(vinyl chloride) films. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 28(4), 332-338. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.16216>
- Silva, D. T. F. N. (2018). *Produção e controle de qualidade numa indústria de produtos saneantes* (Relatório de Estágio). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
- Silva, G. A. (2017). *Produção de Biogás a partir de resíduos orgânicos e lodo de esgoto* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
- Wang, H.; Wei, D., Zheng, A., & Xiao, H. (2015). Soil burial biodegradation of antimicrobial biodegradable PBAT films. *Polymer Degradation and Stability*, 116, 14-22. [10.1016/j.polydegradstab.2015.03.007](https://doi.org/10.1016/j.polydegradstab.2015.03.007)
- Wit, W., Hamilton, A., Scheer, R., Stakes, T. & Allan, S. (2019). *Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização*. Relatório WWF – Fundo Mundial para a Natureza, Gland, Suíça. https://jornalismosocioambiental.files.wordpress.com/2019/03/plastic_report_02-2019.pdf.
- Zehetmeyer, G. (2016). *Desenvolvimento e caracterização de embalagens ativas compostas de PBAT com incorporação de nisina* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.