



ESTUDO DA DEGRADAÇÃO DE POLIETILENO E POLIPROPILENO OBTIDOS A PARTIR DA COLETA SELETIVA DO CAMPUS IFCE QUIXADÁ EM SOLO ADUBADO COM HÚMUS DE MINHOCAS

Brito, R. M.^{1*}; Tavares, J. O.¹; Lima, S. G.¹; Medeiros, F. J. F.¹; Feitosa, E. N.¹; França, D. C.¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Quixadá, Av. José de Freitas Queiroz, 5000 - CEP: 63902-580, Quixadá - CE/Brasil
*E-mail de correspondência: rayssa.morais.brito09@aluno.ifce.edu.br

RESUMO

Foi analisada a degradação dos polímeros polietileno (PE) e polipropileno (PP) em solo do IFCE - Campus Quixadá, enriquecido com húmus de minhoca. Os polímeros foram obtidos pela coleta seletiva da instituição. O ensaio, realizado a céu aberto, buscou simular as condições de descarte dos materiais após o uso. As amostras foram retiradas após 15, 30, 45, 60 e 90 dias e analisadas de maneira visual, por perda de massa, Espectroscopia no Infravermelho (FTIR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Visualmente, houve agregação de partículas de solo e aspereza dos materiais, com buracos em amostras de PE. Os resultados de perda de massa mostraram variações mínimas, com aumento de massa em alguns períodos. O FTIR indicou alterações em bandas e picos que indicam o aparecimento de grupos químicos característicos da degradação e o MEV revelou fissuras nas amostras de PP de 90 dias, alinhadas com o esperado.

Palavras-chave: Biodegradação; Polímeros; Húmus de minhoca.

INTRODUÇÃO

Em razão de sua vasta versatilidade, durabilidade e baixo custo, os plásticos, ou polímeros sintéticos, tornaram-se elementos fundamentais para executar as atividades cotidianas, substituindo materiais como metais, madeira e vidro (1). No entanto, estas substituições resultaram em altas demandas de produção e, conseqüentemente, altos níveis de descarte por vezes de maneira inadequada, desencadeando uma série de problemas ambientais.

A preocupação com o descarte inadequado dos polímeros está ligada ao longo tempo de decomposição desses materiais, muitos dos quais são usados apenas uma vez e descartados, como embalagens e recipientes de uso único com vida útil de menos de um mês (2). Por isso, a degradação desses materiais é um processo

altamente desejável (3), especialmente quando realizada por métodos que aproveitam as propriedades do ambiente de descarte e favorecem a atividade microbiológica, já que, tomando como base a realidade brasileira, boa parte desses materiais acabam em lixões, acumulando-se nos solos.

Compreendida como um procedimento natural que pode ocorrer especialmente em solos ou na água, a biodegradação depende, para ser eficiente, de boas condições para a existência de microrganismos degradadores (4). Diante disso, métodos que favoreçam a biodegradação de polímeros têm sido objeto de estudo de diversos pesquisadores. Campos *et al.* (2010) (5) investigaram a biodegradação de filmes de polipropileno (PP), poli(caprolactona) (PCL) e da blenda PP/PCL em solo bruto e com chorume. Eles observaram uma significativa biodegradação dos filmes de PCL em ambas as condições de solo, além de redução na cristalinidade e aumento de relevos na superfície dos filmes de PP.

Entre os polímeros mais utilizados no Brasil estão o polietileno (PE) e o polipropileno (PP), representando quase 60% do consumo de resinas plásticas no país (6). O polietileno, utilizado principalmente na produção de embalagens, corresponde a 39,6% dessa demanda, e é valorizado por sua alta resistência química, flexibilidade, fácil processamento e baixo custo (7). No entanto, por possuir baixa biodegradabilidade (8) e gerar um grande volume de resíduos, trata-se de um dos principais contribuintes para a poluição plástica.

O polipropileno (PP), outro polímero bastante utilizado na fabricação de plásticos descartáveis, com ampla aplicação em embalagens alimentares, equipamentos médico-cirúrgicos, fibras e fios têxteis (9), é uma poliolefina adquirida por meio da polimerização do propileno, classificado como homopolímero, termoplástico e semicristalino, e representa um material de alta durabilidade e difícil biodegradação (10).

Assim, tendo em vista a promoção de um ambiente favorável a degradação eficiente e considerando os materiais poliméricos mais consumidos no Brasil, este estudo analisou a degradação, em solo adubado com húmus de minhoca, dos polímeros polipropileno (PP) e polietileno (PE) obtidos através da coleta seletiva do IFCE campus Quixadá.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Utilizou-se polietileno (PE) e polipropileno (PP) obtidos na coleta seletiva do campus IFCE Quixadá na forma de embalagens de lanches (PE) e copos descartáveis (PP).

Preparo das amostras

Após a coleta, as amostras foram higienizadas e cortadas em tamanhos padronizados: 18x18 cm para o PE e 10x75 mm para o PP. Foram preparadas 100 amostras, 50 de cada polímero. Em seguida, as amostras foram numeradas e pesadas em uma balança analítica de alta precisão.

Preparo do solo e adição das amostras

Foi utilizado solo do campus IFCE Quixadá adubado com húmus de minhoca. Após a limpeza do local, o solo foi descompactado e misturado com 20 kg de húmus. O solo foi regado duas vezes ao dia por oito dias para manter a umidade e permitir a incorporação da matéria orgânica.

Para enterrar as amostras o espaço foi dividido para PE e PP, com as amostras dispostas em 5 fileiras de 10 unidades cada para facilitar a remoção, com uma fileira sendo retirada a cada 15 dias, até 90 dias. Nesse período, o solo foi regado diariamente, conforme o necessário para manter a umidade e favorecer a proliferação dos microrganismos degradadores.

Perda de massa

As medidas de perda de massa das amostras foram obtidas em escala analítica em uma balança de alta precisão antes e após os ensaios.

Os cálculos foram feitos com base na Equação 1(5):

$$\text{Perda de massa (\%)} = \left[\frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \right] \times 100\% \quad (1)$$

Na qual W_0 é a massa inicial do polímero e W_1 é a massa depois do processo a que ele foi submetido. Para W_0 se utilizou a massa média das 50 amostras de cada polímero em seu estado original, e para W_1 a média das 10 amostras de cada ensaio.

Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho foi realizada em um Espectrômetro FTIR Cary 630 da Agilent Technologies, com varredura de 4000 a 400 cm^{-1} .

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

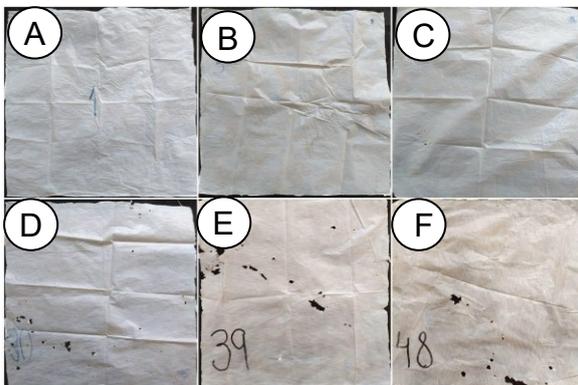
A morfologia dos filmes foi analisada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) HITACHI TM 3000, no Núcleo de Análises Geológicas (NAGEO) da Universidade Federal do Ceará. As análises foram feitas na superfície de cada amostra após os períodos de exposição ao ensaio de degradação em solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise visual

A análise visual revelou mudanças nas amostras ao longo do tempo. Nas amostras de PE, observou-se a agregação de partículas do solo, o que deixou a superfície mais áspera (Figura 1). Além disso, observa-se buracos de vários tamanhos, especialmente nas amostras de 45, 60 e 90 dias (Figura 1D; 1E; 1F), possivelmente causados por pequenos organismos vivos, como formigas, cuja presença é indicada na Figura 2.

Figura 1 - PE: A - original, B - após 15 dias, C - após 30 dias, D - após 45 dias, E - após 60 dias, F - após 90 dias.



Fonte: Autor (2024).

Figura 2 - Presença de formigueiro no ambiente de estudo.

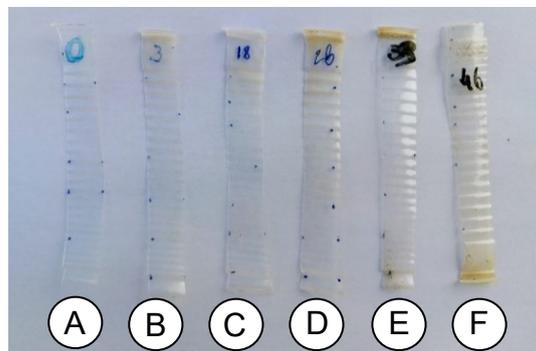


Fonte: Autor (2023).

Para PP, também foi observada a agregação de partículas do solo ao longo do ensaio, resultando em uma textura mais áspera (Figura 3). A olho nu, foram notados arranhões na superfície e um aumento na flexibilidade das amostras, especialmente nas de 60 e 90 dias (Figura 3E; 3F). Essas mudanças podem ser atribuídas à

exposição aos fatores climáticos no ambiente natural, como radiação solar, chuvas, umidade e oscilações de temperatura, que contribuem para os processos de fotodegradação e degradação térmica dos polímeros (11).

Figura 3 - PP: A - original, B - após 15 dias, C - após 30 dias, D - após 45 dias, E- após 60 dias, F - após 90 dias.



Fonte: Autor (2024).

Medidas de massa

De maneira geral, as medidas de massa para ambos os polímeros (PE e PP) dentro do período estudado (0, 15, 30, 45, 60 e 90 dias) não apresentaram variações significativas, os resultados estão expostos nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Perda de massa de PE.

Polietileno (PE)		
Amostras	Massa média (g)	% de Perda de Massa
Original	0,2953	-
15 dias	0,2813	4,7688
30 dias	0,2971	-0,6014
45 dias	0,2960	-0,2391
60 dias	0,2915	1,2914
90 dias	0,2892	2,0871

Tabela 2 - Perda de massa de PP.

Polipropileno (PE)		
Amostras	Massa média (g)	% de Perda de Massa
Original	0,0910	-
15 dias	0,0881	3,1006
30 dias	0,0949	-4,3430
45 dias	0,0905	-0,4948
60 dias	0,0891	2,0671
90 dias	0,0938	-2,4189

Para PE, verificou-se a diminuição da massa após a inserção no solo com húmus das amostras de 15, 60 e 90 dias, sendo as amostras de 15 dias as que apresentaram maior perda de massa (Tabela 1). As demais amostras apresentaram ganho de massa. A variação na massa dos polímeros após o tratamento é crucial para

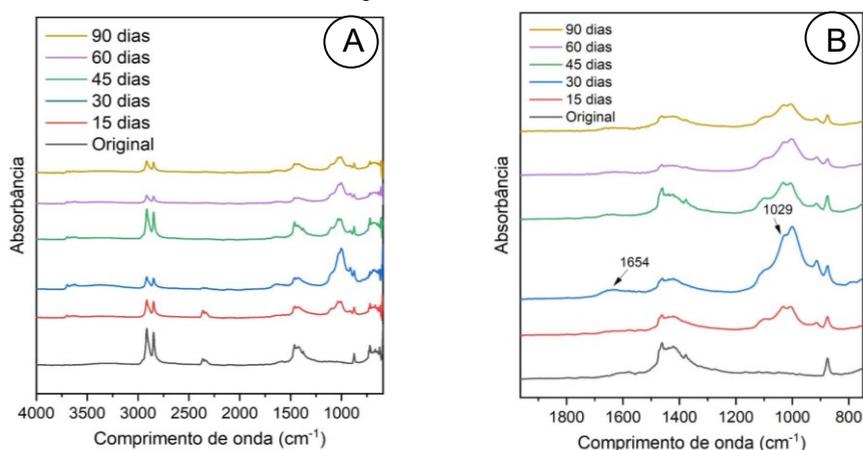
avaliar a biodegradação. Uma redução na massa indica que o material pode ter sido parcialmente consumido ou disperso. Contudo, em alguns casos, a massa pode aumentar devido à agregação de elementos como oxigênio, ou à adesão de microrganismos, componentes extracelulares, e partículas do solo (12,13,14,15).

Para o PP, verificou-se a diminuição da massa após a inserção no solo com húmus das amostras de 15, 45 e 60 dias, e aumento nas demais (Tabela 2). Assim como PE, as amostras de 15 dias apresentaram a maior perda de massa.

Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As Figuras 4 e 5 (A e B) representam os espectros de FTIR das amostras de PE e PP original e após os ensaios no solo com húmus de minhoca durante 15, 30, 45, 60 e 90 dias.

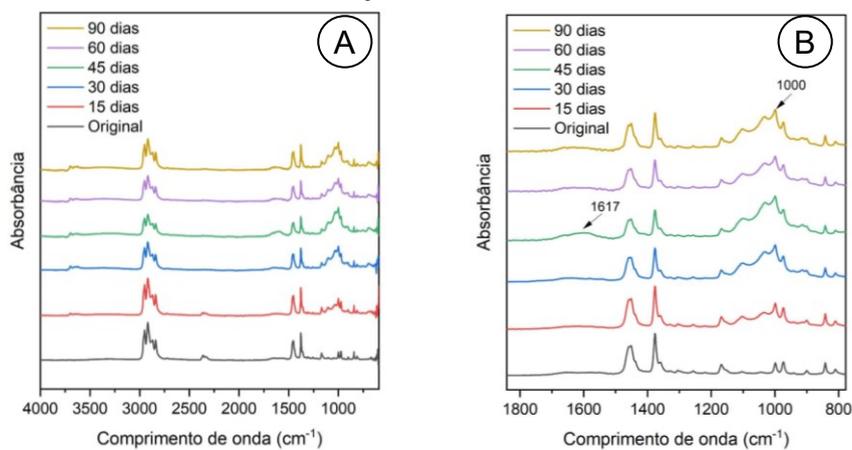
Figura 4 - Espectro de absorção FTIR de amostras de PE: A - em diferentes intervalos; B - referente a absorção da faixa de 800-1800 cm^{-1} .



Conforme a Figura 4A, os espectros de FTIR dos filmes de PE demonstraram pequenas alterações ao decorrer dos ensaios. Em comparação com a amostra original foram identificados grupos funcionais com picos em 719 cm^{-1} (deformação oscilante de tipo médio de $-\text{CH}_2$), 2847 cm^{-1} , 2915 cm^{-1} (alongamento forte simétrico e assimétrico de $-\text{CH}_2$), 1462 cm^{-1} , 1472 cm^{-1} (alongamento da ligação $-\text{C} = \text{C}$) e 1377 cm^{-1} (fraca deformação simétrica do grupo- CH_3), que não se alteraram após os ensaios, com somente pequenas variações de intensidade (16). As mudanças mais significativas foram observadas no ensaio de 30 dias com o início de uma banda de leve intensidade na faixa de 1600-1800 cm^{-1} (Figura 4B) atribuída a possível presença do grupo carbonila ($\text{C}=\text{O}$) (17) que pode indicar um início de degradação, uma vez

que são grupos encontrados na maioria dos produtos de degradação de polietileno (18). Além disso, foi possível observar um aumento de intensidade e um alargamento dos picos entre 831-1172 cm^{-1} (Figura 4B), podendo o pico em 1029 cm^{-1} ser originado do grupo C-O (19).

Figura 5 - Espectro de absorção FTIR de amostras de PP: A - em diferentes intervalos; B - referente a absorção da faixa de 800-1800 cm^{-1} .



Através dos espectros FTIR de PP (Figura 5A), observou-se que as bandas características do polímero não obtiveram grandes modificações, mantendo com o passar do tempo as bandas em 2950, 2917, 2867, 2840, 1458, 1376, 1167, 997 e 973 cm^{-1} , que são atribuídas ao alongamento CH_3 , alongamento assimétrico CH_2 , alongamento simétrico CH_2 , alongamento simétrico CH_2 , vibração de flexão CH_2 , vibração de flexão CH_3 , vibração de deformação simétrica CH_3 , vibração de balanço CH_3 e vibração de balanço CH_2 , respectivamente (20).

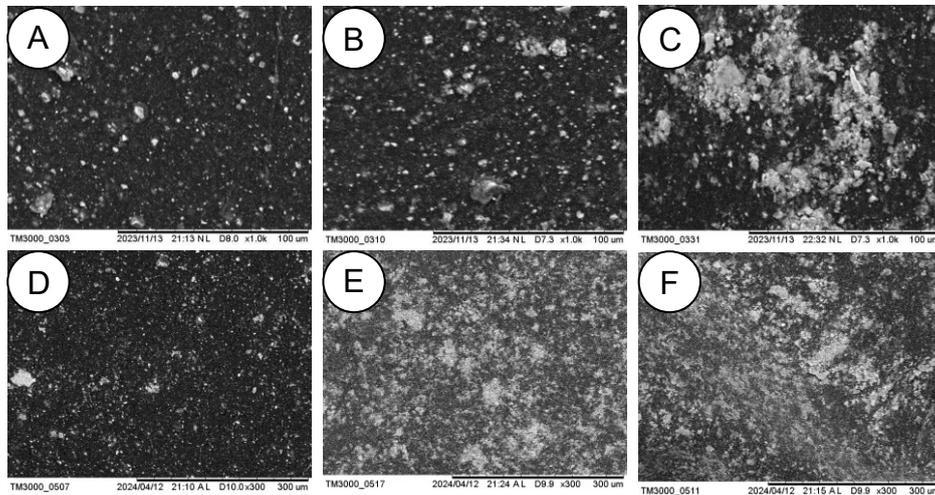
Em função do tempo exposto ao intemperismo natural, picos na região da carbonila podem aparecer decorrentes do processo de degradação do PP (4). O ensaio de 45 dias apresentou o início de uma banda de leve intensidade nesta faixa (1600-1800 cm^{-1}), conforme a Figura 5B. Devido a suas propriedades hidrofóbicas, o PP é um polímero que suporta umidade, o que dificulta o ataque enzimático e, como consequência, o torna um material resistente a decomposição por microrganismos no ambiente (21).

A principal modificação observada foi um alargamento do pico localizado em 1000 cm^{-1} a partir do ensaio de 15 dias (Figura 5B) que pode indicar o início de mudanças na cristalinidade do PP (22).

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

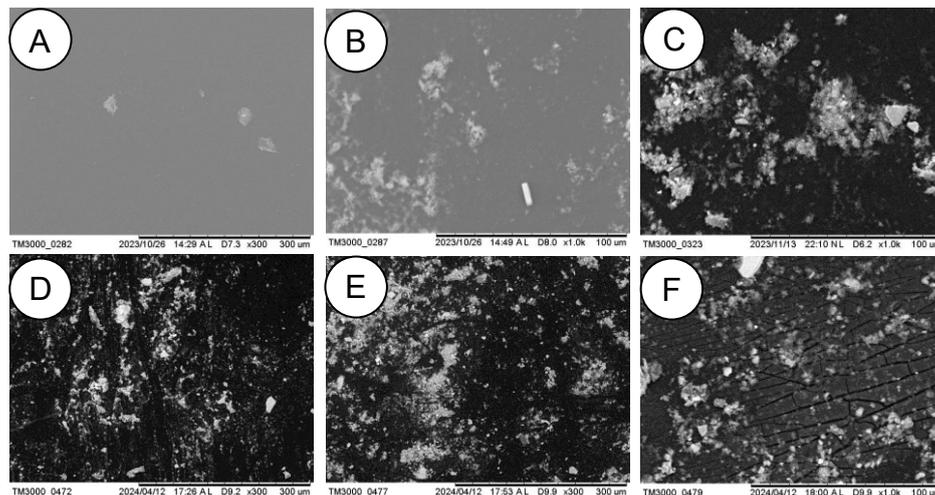
As Figuras 6 e 7 (A, B, C, D, E e F) apresentam as micrografias das amostras de PE e PP original e após os ensaios, respectivamente.

Figura 6 - MEV de PE: A - original, B - após 15 dias, C - após 30 dias, D - após 45 dias, E - após 60 dias, F - após 90 dias.



Os micro-organismos do solo geram material extracelular, principalmente exopolissacarídeos e proteínas, que se fixam nas partículas do solo, formando microagregados. Ao entrar em contato, esse material pode se aderir a superfície do polímero e levar a sua erosão, com a ocorrência de furos e outras evidências (23). No entanto, devido à agregação da matéria orgânica ao longo do ensaio, não foi possível observar mudanças na estrutura das amostras de PE, conforme a Figura 6.

Figura 7 - MEV de PP: A - original, B - após 15 dias, C - após 30 dias, D - após 45 dias, E - após 60 dias, F - após 90 dias.



As micrografias corroboram com os resultados obtidos pelo FTIR e as análises visuais. Atribui-se o aumento do teor de matéria orgânica agregada ao emprego do húmus de minhoca incorporado ao solo para a realização dos ensaios, já que devido a atuação das minhocas no tritramento dos resíduos orgânicos se configura como um adubo orgânico eficiente na elevação da matéria orgânica dos solos, contribuindo para o enriquecimento da população de microrganismos decompositores (24).

Para PP, além da agregação de material orgânico no decorrer do ensaio (Figura 7), os MEV apresentaram para o tempo de 90 dias (Figura 7F) o aparecimento de fissuras uniformes na estrutura do polímero, indicando um início do processo de degradação. A exposição constante a fatores climáticos, como radiação solar, vento e chuvas tornam os plásticos mais frágeis e quebradiços, causando fissuras em sua superfície (12). Além disso, apesar de resistente à decomposição por microrganismos, o PP pode apresentar mudanças morfológicas provocadas por contração das camadas da superfície, como consequência da quemi-cristalização. Essas mudanças também são indicativos de possível ataque microbiano na superfície polimérica (5).

CONCLUSÃO

Os resultados não mostraram degradação significativa para PE e PP. A adição de húmus favoreceu a agregação de partículas, tornando os polímeros mais ásperos. O PE apresentou furos de diversos tamanhos e o PP pequenos arranhões, sem variações importantes na perda de massa. Os FTIR indicaram o início de uma banda na região da carbonila, sugerindo o começo da degradação. Os resultados de MEV revelaram acúmulo de matéria orgânica e fissuras nas amostras de PP, evidenciando a ação das condições ambientais sobre a estrutura dos polímeros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FUNCAP pelo fomento à pesquisa e ao IFCE pela infraestrutura ofertada.

REFERÊNCIAS

(1) BOSCARO, M. E. Biodegradação de filmes de polipropileno (PP), poli (hidroxibutirato-co-valerato)(PHBV) e blenda pré-irradiados com luz UV. TCC (Bacharelado em Física) - Universidade Estadual Paulista, UNESP/SP, Rio Claro, 2011. hdl.handle.net/11449/118371.

- (2) ACHILIAS, D. S.; ROUPAKIAS, C.; MEGALOKONOMOS, P.; LAPPAS, A. A.; ANTONAKOU, V. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials*, v. 149, n. 3, p. 536–542, 2007. doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.076.
- (3) DE FRANÇA, D. C. Efeito da incorporação de PCL e de compatibilizante na degradação do poliestireno. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Campina Grande, UFCG/PB, Campina Grande, 2016. dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/19314.
- (4) MONTAGNA, L. S. Desenvolvimento de polipropileno ambientalmente degradável. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. 2014. hdl.handle.net/10183/96383.
- (5) CAMPOS, A.; MARCONATO, J. C.; FRANCHETTI, S. M. M. Biodegradação de Filmes de PP/PCL em Solo e Solo com Chorume. *POLÍMEROS*, v. 20, p. 295-300, 2010. doi.org/10.1590/S0104-14282010005000039.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO (ABIPLAST). Perfil 2022. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/09/perfil_2022_pt.pdf>. Acesso em: 06 de junho de 2024.
- (7) GORNI, A. A. Introdução aos plásticos. *Revista Plástico Industrial*, v. 10, n. 09, 2003. Disponível em: <<http://www.gorni.eng.br/intropol.html>>. Acesso em: 06 de junho de 2024.
- (8) DE SOUZA, G.T. A. M. et al. Biodegradação de polietileno e bioplástico no solo. *AMBIENTE & ÁGUA-UMA REVISTA INTERDISCIPLINAR DE CIÊNCIA APLICADA*, v. 1172-1180, 2016. doi.org/10.4136/ambi-agua.1919.
- (9) FARIA, P. C.; WISBECK, E.; DIAS, L. P. Biodegradação de polipropileno reciclado (ppr) e de poli (tereftalato de etileno) reciclado (petr) por *Pleurotus ostreatus*. *MATÉRIA* (Rio de Janeiro), v. 20, n. 2, p. 452-459, 2015. doi.org/10.1590/S1517-707620150002.0045.
- (10) FARIA, A. U. Biodegradação de polipropileno (PP), de polihidroxibutirato (PHB) e da blenda PP/PHB (1:1) por microrganismos de rio poluído e efluente bruto de refinaria de petróleo. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista, UNESP/SP, Rio Claro, 2009. hdl.handle.net/11449/94982.
- (11) FOLLMANN, A. J. et al. Degradação de sacolas plásticas convencionais e oxibiodegradáveis. *CIÊNCIA E NATURA*, v. 1, pág. 186-192, 2017. doi.org/10.5902/2179460X24176.
- (12) CHANDRA, R.; RUSTGI, R. Biodegradable polymers. *Progress in Polymer Science*, Londres, v. 23, p. 1273-1335, 1998. doi.org/10.1016/S0079-6700(97)00039-7.

- (13) FLEMMING, H. Relevância dos biofilmes para a biodeterioração de superfícies de materiais poliméricos. *DEGRADAÇÃO E ESTABILIDADE DO POLÍMERO*, v. 59, n. 1-3, p. 309-315, 1998. doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00189-4.
- (14) LUCAS, N.; BIENAIME, C.; BELLOY, C.; QUENEUDEC, M.; SILVESTRE, F.; NAVA SAUCEDO, J. E. Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques, *Chemosphere*, Oxford, v. 73, p. 429-442, 2008. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.06.064. Epub 2008 Aug 23. PMID: 18723204.
- (15) SHAH, A.; HASAN, F.; HAMEED, A.; AHMED, S. Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, v. 26, n. 3, p. 246-265, 2008. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005. Epub 2008 Jan 26. PMID: 18337047.
- (16) TOFA, T. S.; YE, F.; KUNJALI, K. L.; DUTTA, J. Fotodegradação de luz visível aprimorada de fragmentos microplásticos com fotocatalisadores de nanorod de óxido de zinco/platina plasmônica. *CATALYSTS*, v. 9, n. 10, p. 819, 2019. doi.org/10.3390/catal9100819
- (17) LOPES, V. C. P. Foto e biodegradação de PEBD, PHB e suas blendas. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista, UNESP/SP, Rio Claro, 2011. hdl.handle.net/11449/94984.
- (18) MANZUR, L. et al. Avaliação da degradação em solo de embalagens plásticas oxidegradáveis. 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Foz do Iguaçu, PR, 2009. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2009/PDF/programa.pdf>>. Acesso em: 06 de junho de 2024.
- (19) Sheng, L., Zhang, Y., Xie, X. et al. Separador de polietileno ativado por irradiação de raios gama para melhorar o desempenho da bateria baseada em lítio. *J MATER SCI* 56, 20026–20036, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06543-4>
- (20) POTRČ, S. et al. Two-layer functional coatings of chitosan particles with embedded catechin and pomegranate extracts for potential active packaging. *Polymers*, v. 12, n. 9, p. 1855, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12091855>.
- (21) FARIA, A. U.; MARTINS-FRANCHETTI, S. M. Biodegradação de filmes de polipropileno (PP), poli (3-hidroxibutirato)(PHB) e blenda de PP/PHB por microrganismos das águas do Rio Atibaia. *POLÍMEROS*, v. 20, p. 141-147, 2010. doi.org/10.1590/S0104-14282010005000024.
- (22) LONGO, C. et al. Estudo de degradação de polipropileno (PP) e polipropileno biorientado (BOPP) no meio ambiente. *MATERIALS RESEARCH*, v. 14, p. 442-448, 2011. doi.org/10.1590/S1516-14392011005000080.
- (23) BUCIOLI, Elaine Cristina. Biodegradação de filmes de polietileno de baixa densidade (PEBD), polihidroxibutirato-co-hidroxivalerato (PHBV) e blenda de PEBD/PHBV (70/30), em coluna de solo. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista, UNESP/SP, Rio Claro, 2014. hdl.handle.net/11449/110424.

(24) RICCI, M. Manual de vermicompostagem. EMBRAPA-CPAF, Rondônia. Documentos, 31. 1996. ISSN: 0103-9865.

STUDY OF THE DEGRADATION OF POLYETHYLENE AND POLYPROPYLENE OBTAINED FROM SELECTIVE COLLECTION AT THE IFCE QUIXADÁ CAMPUS IN SOIL FERTILIZED WITH EARTHWORM HUMUS

ABSTRACT

The degradation of polyethylene (PE) and polypropylene (PP) polymers was analyzed in soil from IFCE - Quixadá Campus, enriched with worm humus. The polymers were obtained through the institution's selective collection. The open-air test aimed to simulate the conditions of material disposal after use. Samples were taken after 15, 30, 45, 60, and 90 days and analyzed by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), visual inspection, and mass loss. The results showed minimal variations, with an increase in mass during certain periods. Visually, there was soil particle aggregation and material roughness, with holes in the PE samples. The FTIR indicated changes in bands and peaks that suggest the appearance of chemical groups characteristic of degradation, and MEV revealed cracks in the 90-day PP samples, consistent with expectations.

Keywords: Biodegradation; Polymers; Earthworm humus.