

Deterioração in situ de espumas de poliuretanos comerciais com base renovável por compostagem de cama aviária

As espumas de poliuretanos (PU), com estruturas rígidas a flexíveis, são materiais comerciais amplamente utilizadas devido a sua versatilidade. Contudo, os problemas causados pelo descarte inadequado e baixa degradabilidade no ambiente desta classe de polímeros tem levado buscar alternativas para a minimizar estes impactos. O uso de matérias-primas a partir de fontes renováveis para a produção de espumas de poliuretanos e a compostagem são pontos que devem ser levados em consideração. A compostagem também se tornou uma opção para o principal resíduo da avicultura, a cama aviária. Este trabalho teve como objetivo avaliar a deterioração in situ das espumas de poliuretanos em compostagem da cama aviária. As espumas permaneceram por 90 dias enterradas em pilhas estáticas de compostagem em ambiente externo. A compostagem foi acompanhada pela medição da temperatura, umidade, teor de carbono e nitrogênio. E, as amostras das espumas foram avaliadas morfológica e gravimetricamente. O ambiente de compostagem da cama aviária promoveu alterações físicas e morfológicas nas espumas, como fissuras, buracos e rugosidade, e alteração da coloração. Todas as amostras de EPU apresentaram alteração da massa durante a compostagem, no entanto, seguindo uma ordem de: semiflexível > flexível > rígida. Por fim, a destinação de EPU com base renovável em compostagem estática da cama aviária se mostrou viável e um ambiente propício para a deterioração por meios físico-químicos e microbiológicos.

Palavras-chave: Poliuretano; Deterioração; Compostagem.

In situ deterioration of commercial biobased polyurethanes foams by poultry bedding composting

Polyurethane (PU) foams, with rigid and flexible structures, are commercial materials widely used due to their versatility. However, the problems caused by improper disposal and low degradability in the environment of this polymer class has led to the search for alternatives to minimize these impacts. The use of raw materials from renewable sources to produce polyurethane foams as well as composting should be considered. Composting has also become an option for the main poultry waste, poultry bedding. This study aimed to evaluate the deterioration in situ of polyurethane foams in composting poultry bedding. The foams remained buried for 90 days in static compost piles outdoors. Composting was accompanied by the measurement of temperature, humidity, carbon and nitrogen content. The foam samples were evaluated morphologically and gravimetrically. The composting environment of the poultry litter promoted physical and morphological changes in the foams, such as cracks, holes and roughness, and color change. All PU samples showed mass changes during composting, however, following an order of semi-flexible > flexible > rigid. Finally, the destination of PU foams from renewable base in static composting of poultry bedding proved to be viable as well as a useful environment for physical-chemical and microbiological deterioration.

Keywords: Polyurethane; Deterioration; Composting.

Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **18/08/2021**

Approved: **19/09/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Patricia de França Marins 

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/6007238915287147>
<https://orcid.org/0000-0001-8011-2691>
pmarins@alunos.utfpr.edu.br

Carlos Alberto Casali

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2314731193684558>
carloscasali@utfpr.edu.br

Antonio Guilherme Basso Pereira 

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3100468619688208>
<https://orcid.org/0000-0003-0400-3244>
antonioag@utfpr.edu.br

Juliana Regina Kloss

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3968800900294945>
julianakloss@utfpr.edu.br

Reinaldo Yoshio Morita

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3217515072036172>
rmorita@utfpr.edu.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.009.0034

Referencing this:

MARINS, P. F.; CASALI, C. A.; PEREIRA, A. G. B.; KLOSS, J. R.; MORITA, R. Y. Deterioração in situ de espumas de poliuretanos comerciais com base renovável por compostagem de cama aviária. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.9, p.442-457, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.009.0034>

INTRODUÇÃO

Os poliuretanos (PU) são uma classe de polímeros de extrema importância comercial devido às diversas aplicações na indústria, como elastômeros, adesivos, tintas e espumas. Em especial, as espumas de poliuretano (EPU) são materiais comerciais versáteis e encontrados com diferentes formulações, permitindo a obtenção de estruturas rígidas a flexíveis. As estruturas rígidas são compostas predominantemente de poros ou células fechadas (> 90 %) enquanto as flexíveis são abertas conferindo uma menor densidade de rede. (SKLENIČKOVÁ et al., 2020). Geralmente, as EPU são sintetizadas pela reação de um diisocianato ou poliisocianato, alifático e/ou aromático, com um polioliol, na presença de catalisadores, agentes de expansão, surfactantes, entre outros aditivos (GAMA et al., 2018).

A degradação biológica de PU tem sido estudada desde 1960 utilizando microrganismos, principalmente, fungos e bactérias. (MAGNIN et al., 2020). Alguns trabalhos citam as culturas de *Aspergillus terreus*, *Fusarium solani*, *Aerobasidium pullulans*, *Pseudomonas sp.* e *Corynebacterium sp.* (HOWARD, 2002). Em geral, o PU poliéster é mais suscetível ao ataque microbiano quando comparado com o poliéter. (CREGUT et al., 2013). Usualmente, o termo biodegradação de materiais poliméricos ainda é utilizado para relatar uma atividade biológica de degradação, estando associada à ação conjunta e sinérgica de fatores bióticos e abióticos. Assim, a degradação biológica pode ser dividida em etapas: (bio) deterioração, despolimerização ou biofragmentação, assimilação e mineralização (LUCAS et al., 2008).

A cama aviária ou de frango é um material utilizado na produção de aves de corte depositado no chão dos aviários como forma de revestimento e proteção para as aves. Geralmente, consiste de serragem, aparas de madeira, cascas de arroz, entre outros materiais, que durante a criação é incorporado penas, restos de ração e fezes. (GARCÊS et al., 2017). Após um determinado tempo de uso, todo este material misturado é descartado tornando-se um resíduo agroindustrial com alta contaminação por microrganismos patogênicos e, a destinação final também acaba se agravando pelo elevado volume gerado nesta atividade de alta produtividade.

A degradação de estruturas químicas complexas por meio de microrganismos tornou a compostagem relevante como forma de destinação da cama aviária, inclusive tem sido uma solução para transformar os resíduos sólidos, incluindo os plásticos biodegradáveis compostáveis em solo fértil e um método mais eficiente de reciclagem dos materiais, da redução da massa e do volume, além de eliminar os microrganismos patogênicos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a deterioração *in situ* das espumas de poliuretanos comerciais com base renovável em compostagem estática da cama aviária.

REVISÃO TEÓRICA

Espumas de poliuretanos com base renovável

O interesse em utilizar matérias-primas a partir de fontes renováveis vem crescendo devido à preocupação com os impactos gerados ao meio ambiente, principalmente devido ao uso de materiais de base petroquímica. (TAN et al., 2011; AGRAWAL et al., 2017; CONTRERAS et al., 2020; SINGH et al., 2020). Um importante exemplo é a síntese de EPU utilizando polióis derivados de óleos de soja, milho, girassol,

mamona e colza. (TAN et al., 2011; SINGH et al., 2020; CANGEMI et al., 2008; PETROVIC, 2008; TROVATI et al., 2019). A principal estrutura química da composição dos óleos vegetais é o triacilglicerol, um éster derivado de misturas de ácidos graxos saturados ou insaturados e/ou hidroxilados. (ZAMBIAZI et al., 2007). A epoxidação das ligações duplas seguida da abertura do anel oxirano é a modificação química mais utilizada para inserir ou aumentar a quantidade de grupos hidroxila nos ácidos graxos (Figura 1) (CAILLOL et al., 2012; SANTACESARIA et al., 2020).

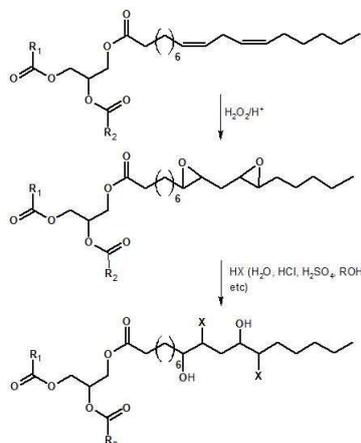


Figura 1: Representação da modificação química de um triacilglicerol com a porção do ácido linoleico, constituinte majoritário no óleo de soja, com a epoxidação seguida da abertura do anel oxirano.

O método químico convencional da formação do epóxido ou oxirano – éter cíclico com três membros – é a partir do tratamento de um alceno com perácido formado in situ pela reação do peróxido de hidrogênio e ácido carboxílico. A etapa de abertura do anel pode ocorrer por reação de hidrogenação, carbonatação, alcólise etc. (PETROVIĆ et al., 2000; LEWANDOWSKI et al., 2020). Desse modo, polióis com dois ou mais grupos hidroxila são sintetizados tornando-os monômeros para a síntese de EPU com rigidez variável e conduzida pelo número de grupos disponíveis para reação. Sabe-se que, polióis com baixa funcionalidade e massa molar alta, com cadeias longas, são utilizados na síntese de EPU mais flexíveis. Os óleos epoxidados são comercialmente disponíveis, principalmente, de soja e mamona, e apresentam um importante papel na indústria do plástico como estabilizantes e plastificantes (SAURABH et al., 2011; HOSNEY et al., 2018).

Em geral, os PU podem apresentar diferentes arranjos estruturais dependendo do poliál e diisocianato usados, contendo partes de cadeias hidrocarbônicas alifáticas de éter ou éster ligadas aos grupos uretânicos ao longo da cadeia do polímero. Desta forma, os PU podem ser classificados como PU poliéster, contendo segmentos de cadeia advindos de um poliál-poliéster, e PU poliéter, contendo segmentos de cadeia advindos de um poliál-poliéter. Muitas das ligações químicas presentes nos PU são sensíveis à hidrólise (éster, uretano, uréia, alofanato e biureto), à oxidação (éter) e à fotodegradação (aromático) quando exposto às condições ambiente, como luz, oxigênio, calor, ar, vento, chuva, microrganismos, podendo levar à degradação (SKLENIČKOVÁ et al., 2020).

Degradação biológica das espumas de poliuretano

O trabalho de Darby et al. (1968) contribuiu para entender a relação entre a composição química

dos PU e a susceptibilidade aos fungos. Para isso, foram sintetizados 100 PU a partir de quatro tipos de diisocianatos, incluindo estruturas aromáticas e alifática linear e 25 dióis entre polióis e dióis e de diferentes massas molares para produzir PU poliésteres e poliéteres. Os testes microbiológicos foram realizados em meio sólido avaliando a inibição do crescimento do *Aspergillus niger*, *A. flavus*, *A. versicolor*, *Penicillium funiculosum*, *Pullularia pullulans* e *Trichoderma sp.* com *Chaetomium globosum*. Segundo os autores, o resultado surpreendente foi a menor disponibilidade dos PU com ligação poliéter como nutrientes para os fungos comparado aos poliésteres. E, mesmo não sendo um bom substrato para o crescimento dos microrganismos, em quase todos os poliéteres, houve traços de desenvolvimento indicando a ausência de efeito fungistático ou fungicida. Foi observado que a disponibilidade da porção do polioliol na estrutura do PU para o ataque enzimático se dá apenas se houver uma cadeia hidrocarbônica suficientemente longa e não ramificada entre as ligações uretânicas, sendo, a presença de três grupos metilenos adjacentes seriam suficientes, por exemplo, butano-1,4-diol, pentano-1,5-diol, hexano-1,6-diol, embora nestes casos, a degradação tenha sido moderada visto que formam poliéter. Com isso, a proximidade das ligações uretânicas pode prejudicar o acesso da enzima aos grupos mais lábeis do polímero.

A biodeterioração é considerada uma degradação que ocorre na superfície e causa mudanças nas propriedades mecânicas, físicas e químicas do material. Contudo, segundo alguns autores, a definição desta etapa se deve principalmente pelo resultado da ação do crescimento dos microrganismos não só na superfície, mas também dentro do material (EGGINS et al., 2001; HUECK, 2001). Um dos métodos para verificar a ocorrência deste processo é a avaliação das modificações macroscópicas do material, como mudança de cor, rugosidade na superfície, formação de buracos e fissuras e desenvolvimento de microrganismos na superfície (Tabela 1) (LUCAS et al., 2008; BARTON-PUDLIK et al., 2017). Entretanto, na biodeterioração também considerada como uma desintegração, pode haver alterações químicas, como a oxidação, na estrutura do polímero induzidas pelo ambiente (FALKIEWICZ-DULIK et al., 2015). Deste modo, o processo degradativo é iniciado com sucessivas quebras, ou seja, progressivamente ocorre a deterioração da espuma em escala macroscópica formando pedaços menores e posteriormente, as interações intermoleculares e ligações covalentes das cadeias do polímero são quebradas gerando estruturas de tamanhos menores na presença de agentes catalíticos - enzimas e espécies radicalares (LUCAS et al., 2008).

Tabela 1: Técnicas de caracterização e avaliação macroscópica de EPU submetidos à degradação biológica.

Característica macroscópica	Técnica	Referência
Fissura	Visual	Shah et al. (2008); Barragán et al. (2016)
Mudança de coloração	Microscopia óptica	Shah et al. (2008); Cangemi et al. (2008); Zhang et al. (2018).
Fragmentação	Microscopia eletrônica de varredura	Shah et al. (2008); Spontón et al. (2013); Lara (2015); Barragán et al. (2016).
Crescimento do microrganismo dentro do material	Microscopia óptica / Microscopia eletrônica de varredura	Amaral et al. (2012).
Variação de massa	Gravimetria	Wang et al. (2008); Barragán et al. (2016).

Em seguida, a despolimerização ocorre em diferentes graus, preferencialmente, nas ligações hidrolisáveis como a éster e a uretânica, catalisada por esterase ou lipase, levando à formação de

oligômeros, trímeros, dímeros e até monômeros. Nas etapas finais da degradação biológica, assimilação e a mineralização, ocorre a formação de nova biomassa e metabólitos dos microrganismos transformando intracelularmente todos os compostos orgânicos em moléculas simples (CO_2 , N_2 e CH_4), H_2O e sais (Figura 2) (ÁLVAREZ-BARRAGÁN et al., 2016; WEI et al., 2017).

Em síntese, todas essas etapas dependem da adaptação do consórcio de microrganismos ao meio contendo a EPU relacionando os fatores físico-químicos e biológicos, podendo ou não favorecer o seu crescimento e a conseqüente adsorção na superfície do material. A alta disponibilidade e facilidade de outras fontes de energia para o microrganismo também podem afetar negativamente a degradação do polímero.

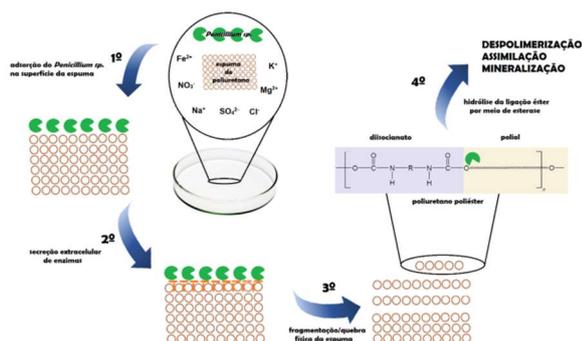


Figura 2: Esquema simplificado das etapas da biodegradação in vitro das EPUs na presença do *Penicillium sp.*

A biodegradação de polímeros, muitas vezes, é abordada de diferentes maneiras na literatura em relação as etapas que envolvem a degradação, seja na consideração ou não dos fatores abióticos, como luz e umidade, seja nas considerações das etapas propriamente dita, como (bio) deterioração, biofragmentação. Um exemplo é o fator mecânico citado por Lucas et al. (2008) que embora não seja tão predominante no processo, no entanto, pode ser uma condição para acelerar a biodegradação em sinergia com os outros parâmetros. Este contexto, talvez seja atribuído as visões/concepções das diferentes áreas de conhecimento para o assunto. Em contrapartida, conforme publicado pela European Bioplastics acerca da norma europeia EN 13432, a biodegradação só é considerada se o material polimérico alcançar 90 % de degradação depois de 6 meses sob condições de compostagem, seguindo métodos laboratoriais exigidos em outras normas (EUROPEAN BIOPLASTICS).

Os inúmeros trabalhos avaliando a biodegradação das EPU demonstram o avanço no entendimento do complexo mecanismo de degradação e da preocupação ambiental destes materiais pós-uso, inclusive devido à dificuldade deste material ser reciclado convencionalmente em razão da sua natureza (ZIA et al., 2007; BERAN et al., 2020). O aumento do uso dos polióis de origem vegetal na produção de EPU, acaba sendo uma alternativa para a produção de materiais mais suscetíveis a degradação em ambiente controlado.

Compostagem de cama aviária

Na maioria dos casos, a cama aviária é destinada a aplicação em terras agrícolas como fertilizante, em razão de ser uma alternativa econômica para a reposição parcial de minerais no solo (LÓPEZ-

MOSQUERA et al., 2008; PITTA et al., 2012; LOURENÇO et al., 2013). Este resíduo contém um alto valor nutricional, principalmente, devido as pequenas quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), e traços de cloro (Cl), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), manganês (Mn), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn) e arsênio (As). E, ao alto nível de compostos nitrogenados como proteínas e aminoácidos e uma quantidade significativa de nitrogênio orgânico (60-80%) (MAHMUD et al., 2015).

Nas fezes das aves são encontradas concentrações microbianas acima de 10^{10} células por grama, sendo de vírus, bactérias, fungos e protozoários. Contudo, os principais estudos destacam o interesse nos microrganismos mineralizadores de nitrogênio, como as culturas do *Bacillus spp.* e *Arthrobacter spp.*, além dos fungos, especialmente o *Aspergillus spp.*. Os fungos filamentosos estão presentes nos aviários e são os responsáveis pela ocorrência de algumas doenças nas aves, contaminação da ração e produção de micotoxinas. (SUGIHARTO, 2019). Comumente, a contaminação da ração está associada ao *Aspergillus flavus* e *Aspergillus niger*. (VERA et al., 2016). Os fungos filamentosos tem capacidade de decompor plantas e animais mortos, obtendo o seu alimento pela quebra de compostos orgânicos com estruturas mais complexas formando espécies mais simples, de baixa massa molar, através da secreção de enzimas extracelulares. Com isso, o grande interesse neste tipo de microrganismo se dá pelo fácil crescimento e alta capacidade de produzir enzimas, como xilanase, pectinase e amilase (GUIMARÃES et al., 2006). Conforme citado por McKelvey et al. (2017) as cepas de *Aspergillus*, *Rhizopus* e *Penicilium* conseguiram produzir protease, celulase, xilanase, lipase, amilase e fitase.

Durante a compostagem ocorre a degradação da matéria orgânica pela ação de microrganismos (mesofílicos e termofílicos), como bactérias, fungos e actinomicetos, em um ambiente quente, úmido e aeróbico. Ao final deste processo biológico natural é produzido dióxido de carbono, água, além do composto ou húmus. Para isso, o controle de alguns fatores é importante, como a temperatura, a composição química da mistura, pH e a disponibilidade de fontes de carbono, nitrogênio, água e oxigênio (KALE et al., 2007; SONG et al., 2009).

Sanchuki et al. (2011) por meio da avaliação das transformações físico-química e microbiológica da cama aviária durante a compostagem, verificaram que tais características permaneceram semelhantes a compostagem de outros tipos de resíduos orgânicos. O composto obtido no final do processo apresentou significativa redução e alteração na diversidade microbiológica indicando a ocorrência das etapas de degradação do material. Ainda, os resultados mostraram a viabilidade da compostagem sem o uso de complementação nutricional ou inoculação no meio. Orrico et al. (2012) também avaliaram a eficiência da compostagem da cama aviária, no entanto, com composições diferentes, por exemplo, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e bagaço de cana-de-açúcar e capim. Os resultados indicaram que o material contendo o capim apresentou maior temperatura durante o processo, possivelmente pelo maior teor de carboidratos não estruturais na composição, favorecendo a degradação e, por consequência, o maior aquecimento. As composições contendo a casca de arroz obtiveram menor redução de massa nos sólidos totais conferindo maior resistência a degradação. Assim, verificaram que o maior teor de lignina na composição aumentou a resistência à degradação.

Degradação de espumas de poliuretano em compostagem

A compostagem tem sido estudada como uma estratégia viável de destinação das EPU visando a redução do impacto negativo destes materiais nos aterros sanitários. A diversidade da população microbiana e a presença, principalmente, dos fungos filamentosos são fatores que favorecem a promoção na degradação destes materiais. Inclusive, o composto produzido após a compostagem de resíduo orgânico doméstico utilizando um reator com temperatura que varia de 60 a 75 °C por 14 dias foi utilizado para a degradação de PU poliéster e poliéter (ZAFAR et al., 2014). Recentemente, outro estudo avaliou a biodegradação de EPU sintetizado a partir de um poliálcool poliéster de algas em dois ambientes separados, o solo e o composto. As amostras foram avaliadas em 4, 8 e 12 semanas permanecendo em condições de alta umidade a 30 °C. Visualmente todos os corpos de prova apresentaram alteração superficial a partir da quarta semana, com perda de massa e redução na força de deflexão à compressão. Foi verificada uma diversidade de bactérias e fungos isolados na superfície do material, como *Pseudomonas*, *Phenyllobacterium*, *Arthrographis*, *Thermomyces* e *Aspergillus*. Os autores verificaram durante o isolamento e o enriquecimento destes microrganismos em meio mínimo, onde o PU era a única fonte de carbono, que houve a manutenção do consórcio microbiano na presença da espuma, enquanto no controle sem o PU ocorreu uma significativa redução na quantidade, indicando que o polímero estava sendo usado como fonte de nutriente (GUNAWAN et al., 2020).

METODOLOGIA

As espumas comerciais de poliuretanos derivadas de óleo vegetal foram gentilmente cedidas pela Khel® Indústria e Comércio LTDA na forma de cubos (20 x 20 x 20 mm) em três formulações: flexível (fEPU), semiflexível (sEPU) e rígida (rEPU). Os demais reagentes de grau analítico foram utilizados como recebidos.

Montagem da pilha de compostagem estática aerada e amostragem

A compostagem seguiu o método de pilha estática aerada realizada com cama de frango coletada no aviário da Unidade Experimental de Ensino e Pesquisa (UNEPE) na fazenda experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Dois Vizinhos. À pilha construída (9,0 m de comprimento, 2,0 m de largura e 0,6 m de altura) foi adicionada a cama aviária in natura composta de casca de arroz, folhas e palha e mantida ao ar livre em condições aeróbicas.

As amostras de PU foram colocadas na metade da altura da pilha (0,3 m) obedecendo a um distanciamento mínimo e igual a 5,0 cm entre as amostras. A umidade foi mantida entre 50-60% com adição de água. Os blocos de EPU ficaram em compostagem por 90 dias. As amostras foram retiradas para análise a cada 15 dias nos primeiros 60 dias de experimento, após esse período passaram a ser coletadas a cada 30 dias. Cada espuma foi acondicionada em saco de tela de poliamida para a avaliação da deterioração (Figura 3). A análise foi realizada em triplicata para cada uma das amostras.

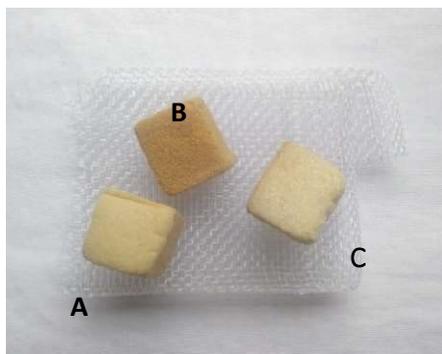


Figura 3: Imagem das amostras de EPU (A) semiflexível, (B) rígida e (C) flexível e a tela de poliamida.

Caracterização da compostagem

As amostras do substrato de compostagem (cama aviária) foram coletadas nos mesmos dias das retiradas das amostras de EPU. O substrato foi coletado em diferentes partes da pilha e conduzido a secagem a 65 °C por 72 h até atingir massa constante para a determinação do teor de umidade, seguindo a metodologia da Embrapa. O pH foi medido em solução de cloreto de cálcio 0,01 M utilizando 10 g do composto e agitação à temperatura ambiente durante 30 min. Ao final, a suspensão permaneceu em repouso por 5 min e o valor do pH do sobrenadante foi medido usando um medidor de pH (DONAGEMA et al., 2011).

Os dados da temperatura ambiente foram obtidos da estação meteorológica local por meio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A temperatura da pilha foi medida e monitorada na profundidade de 0,5 m utilizando um termômetro analógico. A temperatura da pilha foi aferida uma vez por semana com cinco leituras em diferentes pontos.

Análise elementar

A determinação da concentração total de nitrogênio (N) foi realizada com base no método da digestão com ácido sulfúrico, conforme Silva (2009). O teor de carbono total foi determinado pelo método de calcinação a 600 °C por 2 h. Assim, a relação C/N foi determinada.

Caracterização das espumas de poliuretano (EPUs)

Aspecto visual

O aspecto visual das EPUs após o período de compostagem foi avaliado comparativamente com as EPU não compostadas. A presença de alterações físicas, como a formação de fissuras, cavidades, fragmentação, coloração, foram avaliadas.

Análise gravimétrica

As amostras de espumas foram previamente pesadas e, após o tempo de compostagem, foram recuperadas, lavadas brevemente com água destilada para remover o composto ou partículas de solo aderidas e secas a 60 °C até atingir a massa constante para análise. A perda de massa média percentual foi calculada para cada triplicata de amostra de acordo com a equação 1.

$$\text{Perda de Massa (\%)} = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

onde m_i é a massa inicial da espuma PU antes da compostagem e m_f é a massa seca da espuma após a compostagem.

Morfologia da superfície

A morfologia da superfície das EPU foi analisada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os pedaços de amostras lavados e secos foram colocados em suportes de cobre para recobrimento de ouro sob vácuo e pulverização catódica (sputtering) a fim de tornar as amostras condutoras. As imagens de MEV foram obtidas usando o microscópio modelo Zeiss EVO MA15, com voltagem de aceleração de 20 kV e aumento de 40 vezes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens das etapas de montagem da pilha de compostagem contendo as amostras de EPU estão apresentadas na Figura 4.



Figura 4: Imagens das etapas de montagem da pilha de compostagem. (A) disposição das amostras de EPU sobre uma camada da cama aviária; (B) amostras de EPU cobertas com a cama e parcialmente coberta com a palha; (C) a cama aviária totalmente coberta com a palha.

Nos primeiros dias da compostagem foi verificado o aumento da temperatura na pilha alcançando 52,8 °C, sendo que, até o 12º dia manteve-se em cerca dos 50 °C (Figura 5). Considerando que, as compostagens podem chegar a 60-70 °C, foi verificado a possível influência da altura da pilha, visto que, a estrutura montada tinha altura menor que 1 m. Contudo, a manutenção da temperatura ao longo dos dias foi mantida pela presença da cobertura de palha. A temperatura acima de 50 °C no início indica a ação microbiológica no processo da degradação da matéria orgânica presente na cama aviária.

Neste caso, embora haja oscilação nos valores de pH ao longo das semanas, há uma tendência de abaixamento no valor, tornando o meio menos alcalino (Figura 6). A umidade permaneceu entre 40 e 60 % após 15 dias, depois da adição de água. O aumento gradativo no teor de umidade durante o processo, não ultrapassando os 60 %, não comprometeu o trabalho, uma vez que condições anaeróbias foram evitadas. A presença de folhas na composição da pilha de compostagem auxiliou a manutenção da temperatura e por consequência, o teor de umidade, favorecendo o processo de decomposição da cama aviária. Tal processo

também pode ser verificado na relação C/N ao longo da compostagem. No início, o valor de C/N próximo a 20, considerado baixo, se deve ao excesso de compostos nitrogenados. Contudo, a relação C/N se equilibrou ao longo dos 90 dias, visto que, as folhas foram decompostas fornecendo carbono ao meio, ficando próximo de 30:1, considerado uma relação ideal para a compostagem (Figura 7).

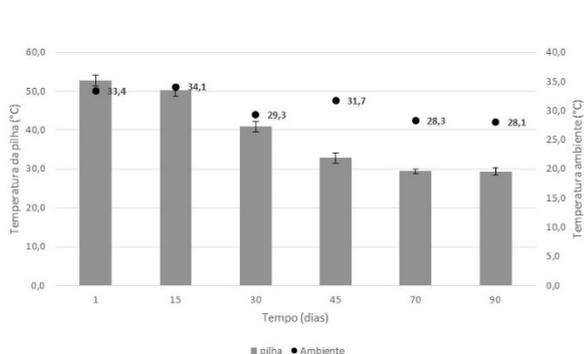


Figura 5: Temperatura média da pilha de compostagem e ambiente do local.

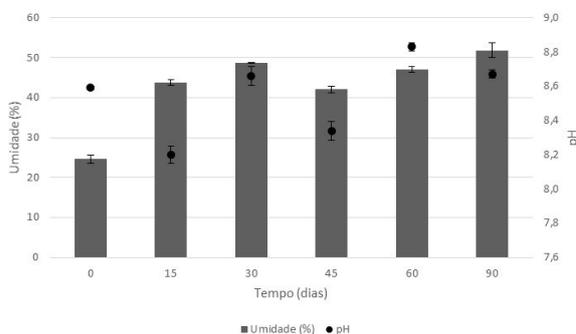


Figura 6: Valores médios medidos de pH e umidade do material de compostagem.

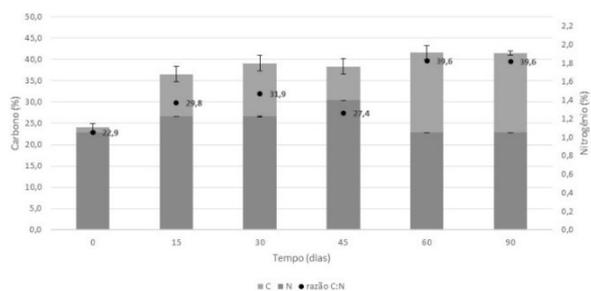


Figura 7: Concentração total de carbono, nitrogênio e a razão C/N de acordo com o tempo de compostagem.

Em condições de compostagem, as amostras de espuma apresentaram alterações na aparência física quando comparadas com as amostras antes da compostagem (Figura 8). A mudança na cor e, principalmente, na presença de pequenas fissuras, buracos e rugosidade na superfície mostra uma leve influência da ação do meio biológico. Essas características foram mais proeminentes nas espumas mais flexíveis e no maior tempo de compostagem. Especialmente, na fEPU foi observado o achatamento das cavidades celulares estruturais da espuma após 30 dias de compostagem.

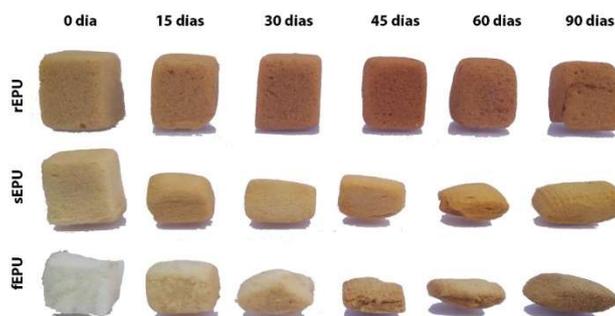


Figura 8: Fotografias das EPUs ao longo do período de compostagem.

Pelas imagens de MEV, na espuma rEPU antes da compostagem foi observada as cavidades celulares bem definidas com algumas células abertas, enquanto o formato estrutural menos organizado, menor e homogêneo foi verificado para as espumas fEPU e sEPU (Figura 9). Após 60 dias, as espumas mais

flexíveis apresentaram alterações na morfologia superficial tornando-se mais deterioradas.

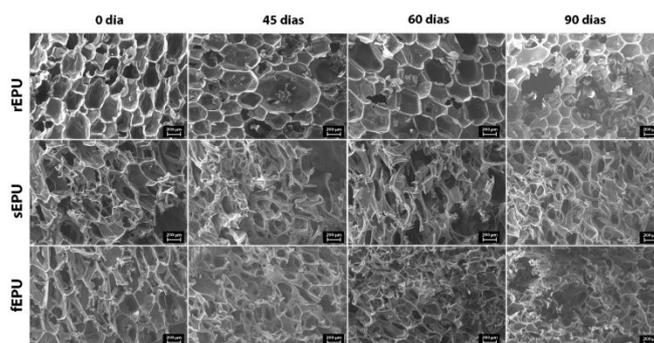


Figura 9: Imagem de MEV das EPU nos períodos de compostagem.

Todas as amostras de espumas perderam massa durante os primeiros 15 dias com valor acima de 10 % (Figura 10) e foi observado um comportamento crescente em até 45 dias, sendo que a fEPU sofreu mais alteração em comparação aos outros tipos de espuma. A rEPU apresentou um comportamento linear de perda de massa ao longo de 60 dias, mesmo perdendo menos massa do que as demais. No caso da fEPU foi superior ao valor somado pela rEPU e sEPU, acima de 21 %. Para rEPU apresentaram variação significativa na perda de massa até 60 dias, porém, esse comportamento não foi seguido até o fim.

Nos últimos 90 dias houve a queda nos valores de porcentagem de perda de massa para todas as espumas, porém, manteve-se o comportamento padrão demonstrado ao longo do período de compostagem. Assim, a variação na perda de massa seguiu a ordem: semiflexível > flexível > rígida.

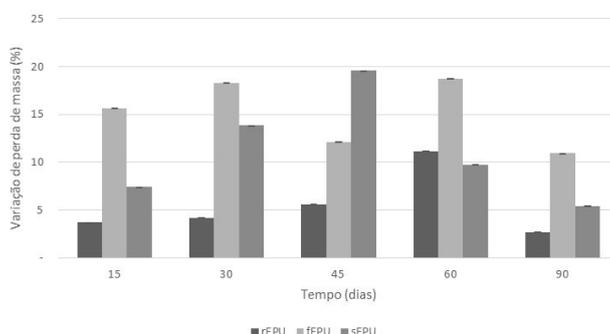


Figura 10: Perda de massa das EPU submetidas a compostagem por diferentes períodos.

Pela taxa de degradação (Figura 11), calculada a partir da perda de massa em função do tempo de compostagem, foi verificado um perfil coerente nas amostras da diminuição ao longo da compostagem, fato que, pode estar associado a diminuição da atividade microbiana no meio visto que, o processo da compostagem começou a ser finalizado a partir de 60 dias e, conseqüentemente, a velocidade de deterioração do material polimérico foi gradativamente reduzida. No caso da rEPU, os valores da taxa de degradação foram menores comparadas aos outros tipos de espuma, comportamento esperado em razão da composição do polímero e concordante com os resultados observados na avaliação visual e de microscopia.

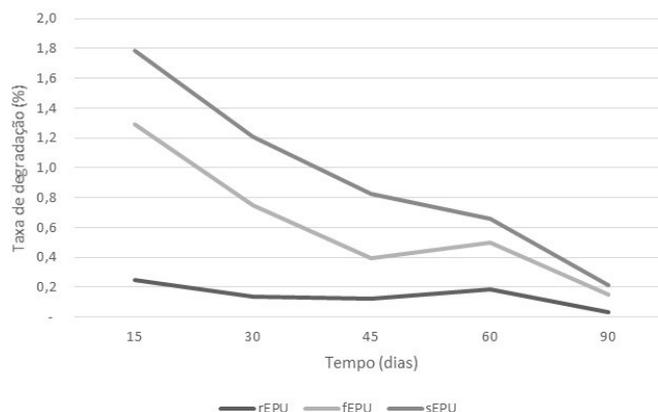


Figura 11: Taxa de degradação das EPU em relação aos períodos de compostagem.

Compostagem estática da cama aviária

Conforme observado por Rebolledo et al. (2008) a sucessão da população microbiana (bactérias, actinomicetos, fungos) está ligada a temperatura da compostagem, de modo que determina a eficiência e o sucesso do processo. Para Fiori et al. (2008) a temperatura é um indicador do equilíbrio biológico da compostagem, representando a inativação da bactéria patogênica durante o aumento da temperatura (fase termofílica) e o abaixamento gradativo até a temperatura ambiente, indicando a estabilização do processo e a formação do húmus (humificação).

Um valor de pH acima de 8,5 no início da compostagem também foi observado por Sanchuki et al. (2011). A presença de um material rico em matéria orgânica, contendo compostos nitrogenados, é responsável pelo caráter alcalino do meio. O abaixamento nos valores de pH ao longo das semanas se deve as reações de oxidação da matéria orgânica levando à formação de ácidos orgânicos (VALENTE et al., 2009). Ainda, os microrganismos trabalhando na fase mesofílica, em aproximadamente 40-45 °C, liberam carbono orgânico na forma inorgânica (CO₂) para o meio (TUOMELA et al., 2000). Para a estabilidade da matéria orgânica é essencial que o teor de umidade da compostagem esteja entre 40 e 60 % (FIORI et al., 2008).

Portanto, a matéria orgânica e os compostos nitrogenados presentes na cama aviária foram degradados pelos microrganismos no meio aeróbico ao longo dos 90 dias em condição estática. O final do processo de compostagem foi verificado por não liberar mais calor, indicando a diminuição da atividade microbiana e a pela manutenção da razão C/N, confirmando a digestão do carbono orgânico e a produção de CO₂.

Degradação das espumas de poliuretano

Em geral, a biodegradabilidade dos polímeros é dependente da sua estrutura química, cristalinidade, densidade de ligação cruzada, área superficial e formato (SKLENIČKOVÁ et al., 2020). Os polímeros a base de óleos vegetais são materiais potencialmente biodegradáveis, no entanto, este comportamento pode ser limitado para as EPU quando comparado aos PU termoplásticos devido a presença de ligações cruzadas (PETROVIĆ et al., 2010). Da mesma forma, a cristalinidade das EPU é função do teor do segmento poliéster (porção flexível da cadeia) e do segmento uretânico (porção rígida da

cadeia). Portanto, as sEPU e fEPU são mais afetadas na compostagem por apresentarem maior teor de segmentos flexíveis na cadeia do polímero, ou seja, quantidade maior de grupos polares hidrolisáveis.

O comportamento gradativo das EPU em função do tempo pode estar relacionado ao mecanismo de erosão superficial caracterizado pelo contato com moléculas de água, cujo mecanismo de degradação resulta na hidrólise das ligações químicas, causando significativa perda de massa (Figura 9) (AZEVEDO et al., 2005). De acordo com Dutta et al. (2010) um aumento no número e tamanho dos poros na superfície das espumas de PU ao nível da microscopia eletrônica indica degradação.

A perda de massa pelo processo de fragmentação é um indicativo da deterioração das espumas pela ação do consórcio microbiano, pH do meio, ambiente úmido e com temperatura acima da temperatura ambiente favorecido pela compostagem da cama aviária. Para Sadeghi et al. (2015) a avaliação visual ou a determinação da desintegração dos polímeros medindo a perda de massa devido a biodegradação é a única solução visto a limitação para monitorar o processo de degradação, além das condições ambientais não serem totalmente controladas.

CONCLUSÕES

O controle e a medição dos parâmetros físicos e químicos da compostagem do resíduo da avicultura permitiram o desenvolvimento microbiano do meio, comprovando a ocorrência das etapas da compostagem inclusive a estabilização do composto. O ambiente de compostagem estática da cama aviária promoveu significativas alterações físicas e morfológicas das espumas de poliuretano com base renovável em 90 dias. A presença de fissuras, buracos e rugosidade, e alteração da coloração foram mais proeminentes nas espumas mais flexíveis e com maior tempo de compostagem. Em especial, houve o achatamento das cavidades celulares estruturais da fEPU após 30 dias. Todas as amostras de EPU perderam massa durante a compostagem seguindo a ordem de: semiflexível > flexível > rígida.

Portanto, a destinação de EPU com base renovável em compostagem estática da cama aviária se mostrou viável e um ambiente propício para a deterioração por meios físico-químicos e microbiológicos. Futuramente têm-se o interesse em isolar os microrganismos presentes neste meio a fim de estudar a viabilidade do consórcio microbiano e da ocorrência das outras etapas de degradação no polímero.

REFERÊNCIAS

SKLENIČKOVÁ, K.; ABBRENT, S.; HALECKÝ, M.; KOČÍ, V.; BENEŠ, H.. Biodegradability and ecotoxicity of polyurethane foams: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1818496>

GAMA, N. V.; FERREIRA, A.; TIMMONS, A.. Polyurethane foams: past, present, and future. **Materials**, v.11, n.10, p.1841, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11101841>

MAGNIN, A.; POLLET, E.; PHALIP, V.; AVÉROUS, L.. Evaluation of biological degradation of polyurethanes. **Biotechnology Advances**, v.39, p.107457, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107457>

HOWARD, G. T.. Biodegradation of polyurethane: a review.

International Biodeterioration and Biodegradation, v.49, n.4, p.245-252, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00051-3)

CREGUT, M.; BEDAS, M.; DURAND, M. J.; THOUAND, G.. New insights into polyurethane biodegradation and realistic prospects for the development of a sustainable waste recycling process. **Biotechnology Advances**, v.31, n.8, p.1634-1647, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.08.011>

LUCAS, N.; BIENAIME, C.; BELLOY, C.; QUENEUEDEC, M.; SILVESTRE, F.; SAUCEDO, J. E.. Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques: a review. **Chemosphere**, v.73, n.4, p.429-442, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.06.064>

GARCÉS, A. P. J. T.; AFONSO, S. M. S.; CHILUNDO, A.; JAIROCE, C. T. S.. Evaluation of different litter materials for broiler production in a hot and humid environment: 2. productive performance and carcass characteristics. **Tropical Animal Health and Production**, v.49, p.369-374, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-016-1202-7>

TAN, S.; ABRAHAM, T.; FERENEC, D.; MACOSKO, C. W.. Rigid polyurethane foams from a soybean oil-based Polyol. **Polymer (Guildf)**, v.52, n.13, p.2840-2846, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.04.040>

AGRAWAL, A.; KAUR, R.; WALIA, R. S.. PU foam derived from renewable sources: perspective on properties enhancement: An overview. **European Polymer Journal**, v.95, p.255-274, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.08.022>

CONTRERAS, J.; VALDÉS, O.; GALLARDO, Y.; TORRE, A. F.; NAVARRETE, J.; LISPERGUER, J.; LARA, E. F.; SANTOS, L. S.; NACHTIGALL, F. M.; BARIAS, G.; ABRIL, D.. Development of eco-friendly polyurethane foams based on Lesquerella fendleri (A. Grey) oil-based polyol. **European Polymer Journal**, v.128, p.109606, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109606>

SINGH, I.; SAMAL, S. K.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K.. Recent Advancement in Plant Oil Derived Polyol-Based Polyurethane Foam for Future Perspective: a review. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v.122, n.3, p.1900225, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ejlt.201900225>

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; CLARO NETO, S.; CHIERICE, G. O.. Biodegradation of polyurethane derived from castor oil. **Polímeros**, v.18, n.3, p.201, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000300004>

PETROVIC, Z. S.. Polyurethanes from vegetable oils. **Polymer Reviews**, v.8, n.1, p.109-155, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/15583720701834224>

TROVATI, G.; SUMAN, M. V.; SANCHES, E. A.; CAMPELO, P. H.; BESSAN NETO, R.; CLARO NETO, S.; TROVATI, L. R.. Production and characterization of polyurethane castor oil (Ricinus communis) foam for nautical fender. **Polymer Testing**, v.73, p.87-93, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.010>

ZAMBAZI, R. U. I. C.; PRZYBYLSKI, R.; ZAMBAZI, M. W.; MENDONÇA, C. B.. Fatty Acid Composition of Vegetable Oils and Fats. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v.25, n.1, p.111, 2007.

CAILLOL, S.; DESROCHES, M.; BOUTEVIN, G.; LOUBAT, C.; AUVERGNE, R.; BOUTEVIN, B.. Synthesis of new polyester polyols from epoxidized vegetable oils and biobased acids. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v.114, n.12, p.1447, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/ejlt.201200199>

SANTACESARIA, E.; TURCO, R.; RUSSO, V.; TESSER, R.; SERIO, M.. Soybean Oil Epoxidation: kinetics of the Epoxide Ring Opening Reactions. **Processes**, v.8, n.9, p.1134, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8091134>

PETROVIĆ, Z. S.; GUO, A.; ZHANG, W.. Structure and properties of polyurethanes based on halogenated and nonhalogenated soy-polyols. **Journal of Polymer Science:**

Part A: Polymer Chemistry, v.38, n.22, p.4062-4069, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1002/10990518\(20001115\)38:22<4062::AID-POLA60>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/10990518(20001115)38:22<4062::AID-POLA60>3.0.CO;2-L)

LEWANDOWSKI, G.; MUSIK, M.; MATUSIAK, K. M.; SAŁACIŃSKI, Ł.; MILCHERT, E.. Epoxidation of Vegetable Oils, Unsaturated Fatty Acids and Fatty Acid Esters: a review. **Mini-Reviews in Organic Chemistry**, v.17, n.4, p.412, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2174/1570193X16666190430154319>

SAURABH, T.; PATNAIK, M.; BHAGT, S. L.; RENGE, V. C.. Epoxidation of Vegetable Oils: a review. **International Journal of Advanced Engineering Technology**, v.2, n.4, p.491, 2011.

HOSNEY, H.; NADIEM, B.; ASHOUR, I.; MUSTAFA, I.; EL-SHIBINY, A.. Epoxidized vegetable oil and bio-based materials as PVC plasticizer. **Journal of Applied Polymer Science**, v.135, n.20, p.46270, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.46270>

DARBY, R.T.; KAPLAN, A. M.. Fungal Susceptibility of Polyurethanes. **Applied Microbiology**, v.16, n.6, p.900, 1968. DOI: <https://doi.org/10.1128/am.16.6.900-905.1968>

EGGINS, H. O. W.; OXLEY, T. A.. Biodeterioration and biodegradation. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.48, n.1-4, p.12-15, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(01\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00062-2)

HUECK, H. J.. The biodeterioration of materials - An appraisal. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.48, n.1-4, p.5-11, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(01\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00061-0)

PUDLIK, J. B.; CZAJA, K.; GRZYMEK, M.; LIPOK, J.. Evaluation of wood-polyethylene composites biodegradability caused by filamentous fungi. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v.118, p.10-18, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.01.014>

DULIK, M. F.; JANDA, K.; WYPYCH, G.. **Handbook of Material Biodegradation, Biodeterioration, and Biostabilization**. 2 ed, ChemTec Publishing, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-87-4.50008-6>

SHAH, A. 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: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>

BARRAGÁN, J. A.; MALFAVÓN, L. D.; SUÁREZ, M. V.; HERNÁNDEZ, R. G.; OSORIO, G. A.; TAVERA, H. L.. Biodegradative activities of selected environmental fungi on a polyester polyurethane varnish and polyether polyurethane foams. **Applied and Environmental Microbiology**, v.82, n.17, p.5225-5235, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01344-16>

CANGEMI, J. M.; SANTOS, A. M.; CLARO NETO, S.; CHIERICE, G. O.. Biodegradation of Polyurethane Derived from Castor Oil. **Polímeros**, v.18, n.3, p.201, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000300004>

ZHANG, S.; XIANG, A.; TIAN, H.; RAJULU, A. V.. Water-Blown Castor Oil-Based Polyurethane Foams with Soy Protein as a Reactive Reinforcing Filler. **Journal of Polymers and the**

Environment, v.26, n.1, p.15-22, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s10924-016-0914-0>

SPONTÓN, M.; CASIS, N.; MAZO, P.; RAUD, B.; SIMONETTA, A.; RÍOS, L.. Biodegradation study by *Pseudomonas* sp. of flexible polyurethane foams derived from castor oil.

International Biodeterioration and Biodegradation, v.85, p.85-94, 2013. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.05.019>

LARA, L. F. P.; SUÁREZ, M. V.; CASTILLO, N. N.; CRUZ-GÓMEZ, M. J.; TAVERA, H. L.. Preliminary study on the biodegradation of adipate/phthalate polyester polyurethanes of commercial-type by *Alicyclophilius* sp. BQ8. **Journal of Applied Polymer Science**, v.133, n.6, p.1, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.1002/app.42992>

AMARAL, J. S.; SEPÚLVEDA, M.; CATETO, C. A.; FERNANDES, I. P.; RODRIGUES, A. E.; BELGACEM, M. N.; BARREIRO, M. F.. Fungal degradation of lignin-based rigid polyurethane foams. **Polymer Degradation and Stability**, v.97, n.10, p.2069-2076, 2012. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.03.037>

WANG, H. J.; RONG, M. Z.; ZHANG, M. Q.; HU, J.; CHEN, H. W.; CZIGÁNY, T.. Biodegradable foam plastics based on castor oil. **Biomacromolecules**, v.9, n.2, p.615-623, 2008. DOI:

<https://doi.org/10.1021/bm700915z>

WEI, R.; ZIMMERMANN, W.. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?. **Microbial Biotechnology**, v.10, n.6, p.1308-1322, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1111/1751-7915.12710>

EUROPEAN BIOPLASTICS. **EN 13432 Certified Bioplastics: Performance in industrial composting**. Berlim, 2015.

ZIA, K. M.; BHATTI, H. N.; BHATTI, I. A.. Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review. **Reactive and Functional Polymers**, v.67, n.8, p.675-692, 2007. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004>

BERAN, R.; ZARYBNICKA, L.; MACHOVA, D.. Recycling of rigid polyurethane foam: micro-milled powder used as active filler in polyurethane adhesives. **Journal of Applied Polymer Science**, v.137, n.37, p.49095, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1002/app.49095>

MOSQUERA, M. E. L.; CABALEIRO, F.; SAINZ, M. J.; FABAL, A. L.; CARRAL, E.. Fertilizing value of broiler litter: Effects of drying and pelletizing. **Bioresource Technology**, v.99, n.13, p.5626-5633, 2008. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.034>

PITTA, C. S. R.; ADAMI, P. F.; PELISSARI, A.; ASSMANN, T. S.; FRANCHIN, M. F.; CASSOL, L. C.; SARTOR, L. R.. Year-round poultry litter decomposition and N, P, K and Ca release.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.36, n.3, p.1043, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300034>

LOURENÇO, K. S.; CORRÊA, J. C.; ERNANI, P. R.; LOPES, L. S.; NICOLOSO, R. S.. Crescimento e absorção de nutrientes pelo feijoeiro adubado com cama de aves e fertilizantes minerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.2, p.462, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000200017>

MAHMUD, A.; MEHMOOD, S.; HUSSAIN, J.; AHMAD, S..

Composting of poultry dead birds and litter. **World's Poultry Science Journal**, v.71, n.4, p.621-629, 2015. DOI:

<https://doi.org/10.1017/S0043933915002408>

SUGHARTO, S.. A review of filamentous fungi in broiler production. **Annals of Agricultural Sciences**, v.64, n.1, p.1-8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.05.005>

VERA, R.; AROSEMENA, L.; TORRAS, M. C. Á.. Incidence of filamentous fungi with toxigenic potential on samples of feed and raw materials for their manufacture. **Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences**, v.5, n.6, p.599, 2016. DOI:

<https://doi.org/10.15414/jmbfs.2016.5.6.599-601>

GUIMARÃES, L. H. S.; NOGUEIRA, S. C. P.; MICHELIN, M.; RIZZATTI, A. C. S.; SANDRIM, V. C.; ZANOELO, F. F.; AQUINO, A. C. M. M.; B. JUNIOR, A.; POLIZELI, M.; LOURDES, T. M.. Screening of filamentous fungi for production of enzymes of biotechnological interest. **Brazilian Journal of Microbiology**, v.37, n.4, p.474, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-83822006000400014>

MCKELVEY, S. M.; MURPHY, R. A.. **Fungi: Biology and Applications**. 3 ed. John Wiley and Sons, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119374312.ch8>

KALE, G.; KIJCHAVENGKUL, T.; AURAS, R.; RUBINO, M.; SELKE, S. E.; SINGH, S. P.. Compostability of bioplastic packaging materials: an overview. **Macromolecular Bioscience**, v.7, n.3, p.255, 2007. DOI:

<https://doi.org/10.1002/mabi.200600168>

SONG, J. H.; MURPHY, R. J.; NARAYAN, R.; DAVIES, G. B. H.. Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v.364, n.1526, p.2127, 2009. DOI:

<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289>

SANCHUKI, C. E.; SOCCOL, C. R.; CARVALHO, J. C.; SOCCOL, V. T.; NASCIMENTO, C.; WOJCIECHOWSKI, A. L.. Evaluation of poultry litter traditional composting process. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.54, n.5, p.1053, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-89132011000500024>

ORRICO, A. C. A.; CENTURION, S. R.; FARIAS, R. M.; ORRICO JUNIOR, M. A. P. O.; GARCIA, R. G. Effect of different substrates on composting of poultry litter. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.41, n.7, p.1764, 2012.

DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000700028>

ZAFAR, U.; NZERAM, P.; FUENTES, A. L.; HOULDEN, A.; HEYWORTH, A.; SAIANI, A.; ROBSON, G. D.. Biodegradation of polyester polyurethane during commercial composting and analysis of associated fungal communities. **Bioresource Technology**, v.158, p.374-377, 2014. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.077>

GUNAWAN, N. R.; TESSMAN, M.; SCHREIMAN, A. C.; SIMKOVSKY, R.; SAMOYLOV, A. A.; NEELAKANTAN, N. K.; BEMIS, T. A.; BURKART, M. D.; POMEROY, R. S.; MAYFIELD, S. P.. Rapid biodegradation of renewable polyurethane foams with identification of associated microorganisms and decomposition products. **Bioresource Technology Reports**, v.11, p.100513, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100513>

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.. **Manual de Métodos de**

Análises de Solo. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.** Brasília: 2021.

SILVA, F. C.. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 2 ed. Embrapa: Rio de Janeiro, 2009.

REBOLLIDO, R.; MARTÍNEZ, J.; AGUILERA, Y.; MELCHOR, K.; KOERNER, I.; STEGMANN, R.. Microbial populations during composting process of organic fraction of municipal solid waste. **Applied Ecology and Environmental Research**, v.6, n.3, p.61-67, 2008.

FIORI, M. G. S.; SCHOENHALS, M.; FOLLADOR, F. A. C.. Análise da evolução tempo-eficiência de duas composições de resíduos agroindustriais no processo de com postagem aeróbia. **Engenharia Ambiental: pesquisa e Tecnologia**, v.5, n.3, p.178, 2008.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM JUNIOR, B.; CABRERA, B. R.; MORAES, P.; LOPES, D. C. N.. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, v.58, p.59, 2009. DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v58i224.5074>

TUOMELA, M.; VIKMAN, M.; HATAKKA, A.; ITÄVAARA, M.. Biodegradation of lignin in a compost environment: A review. **Bioresource Technology**, v.72, n.2, p.169-183, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2)

PETROVIĆ, Z. S.; XU, Y.; MILIĆ, J.; GLENN, G.; KLAMCZYNSKI, A.. Biodegradation of Thermoplastic Polyurethanes from Vegetable Oils. **Journal of Polymers and the Environment**, v.18, p.94-97, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0194-z>

AZEVEDO, H.; REIS, R.. **Biodegradable systems in tissue engineering and regenerative medicine.** CRC Press, 2005.

DUTTA, S.; KARAK, N.; SAIKIA, J. P.; KONWAR, B. K.. Biodegradation of Epoxy and MF Modified Polyurethane Films Derived from a Sustainable Resource. **Journal of Polymers and the Environment**, v.18, p.167-176, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0161-8>

SADEGHI, G. M. M.; SAYAF, S.; MIRI, A.. **Dimitris S Achilias Recycling Materials Based on Environmentally Friendly Techniques.** IntechOpen, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5772/59398>

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.