Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Implementação de sistema de análise de biodegradação de polímeros no Instituto Federal de São Paulo campus Itapetininga

Implementation of polymer biodegradation analysis system at Federal Institute of São Paulo Itapetininga campus

Implementación de sistema de análisis de biodegradación de polímeros en el Instituto Federal de São Paulo campus de Itapetininga

Winston Silva Santos[1]
Tamires de Souza Nossa[2]

Resumo: Desde o século XX, os polímeros ganharam destaque devido ao baixo custo e à versatilidade em embalagens e produtos técnicos variados. No entanto, sua durabilidade provoca sérios problemas ambientais, como a poluição por microplásticos. Para reduzir esses danos, surgiram polímeros biodegradáveis que se decompõem por ação de microrganismos, fungos e bactérias. Este projeto visa instalar e validar um método para analisar a biodegradação, medindo a decomposição de biopolímeros em solo simulado. O estudo avalia a biodegradação de amostras de amido termoplástico (TPS) e compósito com 5% de partículas naturais de bambu (TPS+5%PB), comparando perda de massa e análise de imagem. A técnica se mostrou eficaz para monitorar a biodegradação, sendo implementada na instituição e usada em outros estudos acadêmicos relevantes.
Palavras-chave: Biodegradação. biopolímero. Solo simulado. Amido termoplástico. Bambu.

Abstract: Since the 20th century, polymers have gained prominence due to their low cost and versatility in packaging and various technical products. However, its durability causes serious environmental problems, such as pollution from microplastics. To reduce this damage, biodegradable polymers are produced that are decomposed by microorganisms, fungi and bacteria. This project aims to install and validate a method to analyze biodegradation, measuring the decomposition of biopolymers in only a simulated manner. The study evaluates the biodegradation of thermoplastic amide samples (TPS) and composite with 5% natural bamboo particle (TPS+5%PB), comparing mass loss and image analysis. The technique was shown to be effective in monitoring biodegradation, being implemented in the institution and used in other relevant academic studies.
Keywords: Biodegradation. Biopolymer. Simulated soil. Thermoplastic starch. Bamboo.

[1] Graduando em Engrenharia Mecânica. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. ORCID: 0009-0000-4614-506X. E-mail: silva.winston@aluno.ifsp.edu.br
[2] Pós-doutora em Engenharia dos Materiais. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga. ORCID: 0000-0002-4715-5953. E-mail: tamires.nossa@ifsp.edu.br.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Resumen: Desde el siglo XX, los polímeros han ganado protagonismo debido a su bajo coste y versatilidad en envases y diversos productos técnicos. Sin embargo, su durabilidad provoca graves problemas ambientales, como la contaminación por microplásticos. Para reducir estos daños han surgido polímeros biodegradables que se descomponen por la acción de microorganismos, hongos y bacterias. Este proyecto tiene como objetivo instalar y validar un método para analizar la biodegradación midiendo la descomposición de biopolímeros en suelo simulado. El estudio evalúa la biodegradación de almidón termoplástico (TPS) y muestras compuestas con 5% de partículas de bambú naturales (TPS+5%PB), comparando la pérdida de masa y el análisis de imágenes. La técnica demostró ser efectiva para monitorear la biodegradación, siendo implementada en la institución y utilizada en otros estudios académicos relevantes.
Palabras-clave: Biodegradación. biopolímero. Suelo simulado. Almidón termoplástico. Bambú.

Submetido 15/01/2025 **Aceito 10/03/2025** **Publicado 02/04/2025**

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Considerações Iniciais

Diversos polímeros têm demonstrado uma enorme utilidade no mercado mundial, principalmente a partir da segunda metade do século XX. Esses materiais são notáveis por seu fácil processamento, baixa densidade e baixo custo de produção em comparação a outras classes de materiais (Pelletier *et al.*, 2016).

Polímeros como o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS) têm sido amplamente utilizados no design de embalagens e produtos do cotidiano, além de encontrar aplicações técnicas, automotivas, aeronáuticas e médicas (Rodrigues *et al.*, 2016). Esses polímeros contribuem significativamente para uma melhor qualidade de vida e bem-estar humano, oferecendo soluções inovadoras e eficientes em diversos setores. No entanto, devido à sua alta durabilidade e resistência à degradação, a utilização de produtos sintéticos destinados ao uso e descarte imediato apresenta um problema significativo: o longo tempo de degradação, causando grandes danos ao meio ambiente (Mizoguchi, 2019).

A acumulação de resíduos plásticos em aterros sanitários e ambientes marinho é um problema crescente, evidenciado pelo aumento da presença de microplásticos (partículas menores que 5 mm) nos ecossistemas (Carson et al., 2013; Kerschner et al., 2015). Microplásticos afetam diversos ecossistemas, com destaque para os marinhos, onde sua semelhança com fontes de alimento para a vida marinha pode levar à ingestão e à contaminação de organismos marinhos, afetando a cadeia alimentar (Gesamtstudie, 2020). Além da implicação para a saúde humana, sendo encontrado na corrente sanguínea, estudos recentes apontam a presença de microplásticos em tecidos humanos, como pulmões e placenta, indicando a capacidade dessas partículas de atravessar barreiras biológicas (Raaghuis et al., 2021) (Leslie et al., 2022).

Essas descobertas levantam preocupações quanto aos impactos toxicológicos potenciais, já que os microplásticos podem carregar substâncias químicas associadas, como aditivos e poluentes orgânicos persistentes (Fries; Zarfl; Wagner, 2016). A exposição contínua pode levar a inflamações, estresse oxidativo e até mesmo interferências no sistema endócrino, destacando a necessidade de políticas públicas para mitigação do uso excessivo de plásticos e melhor manejo de resíduos (Galloway; Cole; Lewis, 2017).

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Com o avanço da era moderna e o crescente reconhecimento dos impactos ambientais negativos dos plásticos convencionais, foram desenvolvidas soluções para mitigar esses danos, destacando-se os polímeros biodegradáveis, sendo projetados para se degradar através da ação de microrganismos, fungos e bactérias (Silva *et al.*, 2020). Polímeros biodegradáveis se decompõem predominantemente através da ação de microrganismos presentes no ambiente, que quebram as macromoléculas dos polímeros em moléculas menores, resultando na liberação natural de CO_2 (dióxido de carbono) e outros subprodutos (Ruiz *et al.*, 2021). Esse processo é fundamental para a redução do impacto ambiental dos resíduos plásticos, permitindo a reciclagem natural dos materiais e a minimização da poluição (Zhang et al., 2019).

A substituição por polímeros biodegradáveis, que se decompõem mais rapidamente e têm menor impacto ambiental, tornou-se uma questão crucial para a sustentabilidade ambiental (Sobral, 2011) (Jansen et al., 2017). Portanto, a análise das taxas de biodegradação desses biopolímeros é essencial para validação e a mitigação do impacto ambiental causados pelos resíduos plásticos.

O projeto teve como objetivo implantar um método de biodegradação no laboratório de biopolímeros (LaBioPol) do Instituto Federal de São Paulo, campus Itapetininga. A taxa de degradação de amostras compostas por amido termoplástico (TPS) puro e com 5% de partículas de bambu tratado (TPS+5%PB) foi analisada. O teste de biodegradação em solo simulado foi utilizado para avaliar o comportamento das amostras em condições que simulam o ambiente natural de degradação (Funabashi et al., 2009) (Moraes et al., 2022). A metodologia adotada permitiu uma compreensão detalhada do potencial de biodegradação dos materiais. Além disso, foi aplicada a análise de imagens com o software ImageJ, fornecendo dados mais abrangentes sobre o comportamento dos polímeros durante o processo de biodegradação.

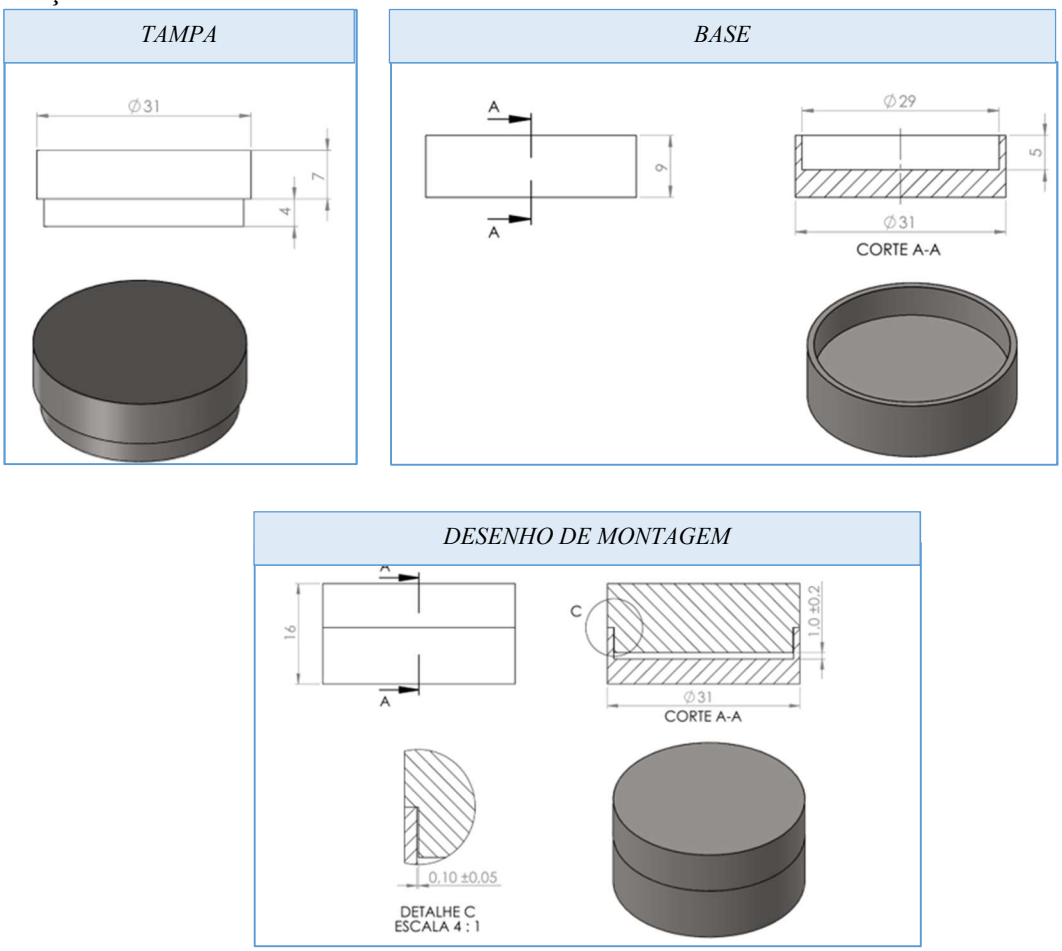
Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Metodologia

Preparação das amostras

Para preparação das amostras, foi necessário confeccionar um molde metálico dividido em duas partes, conforme detalhado no desenho técnico apresentado na Figura 1. Este molde foi projetado para garantir a uniformidade/precisão na forma e peso para preparo das amostras a serem submetidas ao teste de biodegradação.

Figura 1 - Desenho técnico do molde fabricado em aço SAE1045 usado na conformação das amostras.



Fonte: Elaboração própria, 2025

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Devido à limitação do sistema de degradação artificial, que só permitia o monitoramento simultâneo de duas titulações, a escolha recaiu sobre a titulação de 5%, que foi selecionada com o intuito de analisar o impacto de uma adição tão baixa de fibras naturais na resistência à degradação das amostras. Essa abordagem permitiu investigar como a inclusão de pequenas quantidades de bambu afetaria a taxa de biodegradação, comparando-a com o amido termoplástico puro (TPS) e obtendo dados sobre a influência das fibras na compostabilidade do material.

Após a confecção do molde, foram selecionadas amostras de amido termoplástico (TPS) e de amido termoplástico reforçado com 5% de partículas de bambu (TPS-5%PB) produzidos via extrusão reativa em trabalhos desenvolvidos previamente no LaBioPol (Motta, 2023). Devido à limitação do sistema de degradação artificial, que permitia monitorar apenas duas titulações, foi escolhida a titulação de 5% para analisar o impacto de uma baixa quantidade de fibras de bambu na resistência à degradação das amostras. Essa abordagem possibilitou comparar a biodegradação do compósito com bambu e do amido termoplástico puro (TPS), avaliando a influência das fibras na compostabilidade do material. Para evitar contaminação, todo o manuseio das amostras foi realizado com o uso de luvas nitrílicas multiuso descartáveis esterilizadas.

A extrusão reativa, um processo que combina os polímeros com aditivos em condições específicas de temperatura e pressão, foi crucial para a obtenção das propriedades desejadas nas amostras. Este método permitiu a produção de amostras com características homogêneas, sendo utilizada uma extrusora artesanal monorosca com as seguintes zonas de aquecimento: 110°C, 120°C, 120°C e 110°C. Todo o processo ocorreu à uma rotação de 5 rpm (Motta, 2023).

Para se obter uma conformação uniforme das amostras dentro do molde, foi necessário triturar os filamentos extrudados de cada amostra individualmente. Essa etapa visou aumentar a área de contato entre o material e o molde, permitindo que o material fundisse novamente e se moldasse em amostras padronizadas no formato de discos. Após a conformação, todas foram pesadas e medidas para garantir a uniformidade em termos de peso e volume.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Diversos testes laboratoriais foram realizados para otimizar as condições de conformação, variando pressão entre 1 e 10 toneladas e temperatura entre 120° e 180°C. A condição escolhida foi manter o molde e filamentos a 180°C por 12 minutos na estufa. Após esse tempo, as amostras foram transferidas para uma prensa hidráulica de 10 toneladas, onde o material foi submetido a uma pressão constante de 1 tonelada. Esse processo garantiu uma conformação uniforme do material, com estabilização da temperatura do molde até atingir a temperatura ambiente. Assim, foram confeccionadas 12 amostras, de cada tipo de material: TPS e TPS-5%PB. O ensaio foi realizado com todas as amostras em triplicata, distribuídas ao longo das quatro semanas de duração total do teste de biodegradação em solo simulado.

Estação de Biodegradação em Solo Simulado

Foram seguidos os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM G160-03 (2019), que orienta os procedimentos para testes de biodegradação. No entanto, foram necessárias adaptações específicas da técnica visando atender as demandas, condições e insumos disponíveis no campus. Em resposta a essas necessidades, foi projetada a confecção de módulos personalizados para cada amostra. Para isso, foi selecionado um arquivo ".dwg" da plataforma *online* Thingiverse, que foi posteriormente modificado utilizando o *software* Simplify3D. O desenho ajustado foi então utilizado em uma impressora 3D GT4 da GTMax. Esse processo resultou na impressão de 60 módulos ao longo de um período de dois meses, Figura 2.

Figura 2 - Módulos para condução do ensaio de biodegradação em solo simulado.

Fonte: Elaboração própria, 2025

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Para a confecção do solo simulado, foram seguidas rigorosamente as diretrizes estabelecidas pela ASTM G160-03 (2019), que define os procedimentos para a preparação de substratos de teste para biodegradação. Assim, a adesão rigorosa aos parâmetros normativos e a preparação detalhada foi o fator crucial para garantir a precisão e a confiabilidade do teste realizado em laboratório.

De acordo com a norma, o solo deve ser composto por três partes iguais de areia, esterco de cavalo e terra comum. Cada um desses componentes foi tratado e preparado, a areia foi limpa para remover impurezas, o esterco de cavalo foi compostado e triturado para assegurar sua homogeneidade, e a terra comum foi peneirada para eliminar grandes partículas e garantir uma estrutura uniforme (Figura 3). Os componentes foram misturados manualmente e a mistura foi então umedecida com a adição de 30% de água destilada.

Figura 3 - Imagem do solo simulado após a mistura dos componentes.

Fonte: Elaboração própria, 2025

No período de armazenamento, foi essencial manter um controle rigoroso da umidade do solo para garantir que as proporções desejadas de água e terra seca em sua composição fossem preservadas. Para monitorar e ajustar essas proporções, foram realizadas medições dos valores de massa de água e de terra no inóculo. O método adotado para essa etapa foi o de perda de massa. Esse método consiste em realizar medições repetidas da massa do solo em triplicata, para avaliar a variação na umidade ao longo do tempo.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

As amostras foram condicionadas em estufa a 40 °C por 24h e pesadas periodicamente, e as medições de massa foram registradas para calcular a perda de umidade. Esses dados foram essenciais para realizar as correções necessárias nas proporções de água e terra, ajustando o inóculo para os testes subsequentes em solo simulado.

O controle de temperatura e umidade é crucial em testes de biodegradação, pois afeta diretamente a atividade microbiana e a taxa de decomposição dos materiais. Estudos demonstram que esses fatores influenciam tanto a estrutura dos polímeros quanto a composição das populações microbianas envolvidas na degradação (Moraes et al., 2024) (Li; Mclachlan, 2020). Para garantir a precisão dos resultados, é necessário manter esses parâmetros estáveis. Isso assegura a reprodutibilidade dos testes e permite comparações entre diferentes materiais ou condições experimentais.

O controle rigoroso da temperatura e umidade foi garantido durante o teste de biodegradação com uma câmara de umidade Salt Spray, modelo ZL-6001 adaptada. Para evitar trocas gasosas, foi inserida uma espuma ao redor da tampa da câmara, e a água destilada foi monitorada e reabastecida a cada dois dias, mantendo a umidade relativa em 95%. As amostras foram mantidas na câmara a 35°C e 95% de umidade, com essas condições controladas por sistemas digitais. A estabilidade das condições foi fundamental para a precisão dos resultados. As amostras foram retiradas semanalmente para análise, sendo essa a única interrupção nas condições internas estáveis, como mostrado na Figura 4.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Figura 4 - Módulos contendo as amostras já posicionados na câmara de umidade.

Fonte: Elaboração própria, 2025

Método para Análise dos Resultados

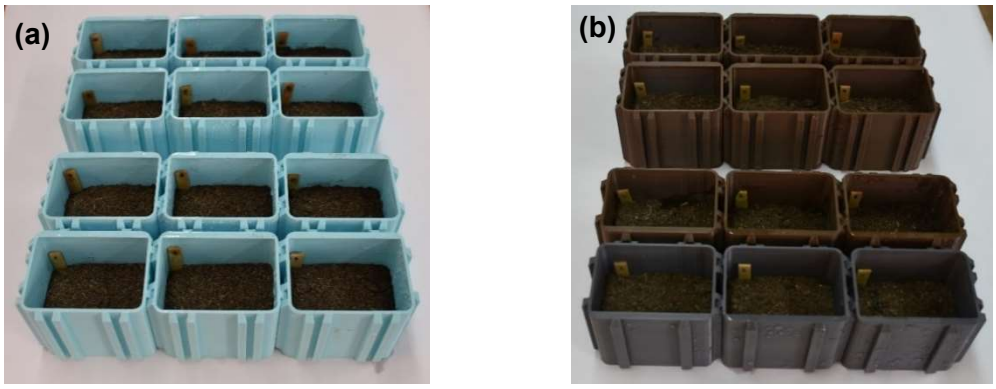
As amostras preparadas foram introduzidas em módulos específicos, que continham uma quantidade padrão de 60 g de inóculo. Este procedimento foi essencial para garantir a consistência nas condições de teste. Cada módulo foi então identificado de forma sistemática com numerações de 1 a 12, correspondendo ao tipo de material, como ilustrado na Figura 5.

A identificação das amostras foi fundamental para rastrear e analisar os materiais durante o estudo, garantindo a organização dos dados e a correta atribuição dos resultados de desempenho a cada tipo de material testado. A cada sete dias, uma triplicata de amostras era retirada do equipamento, seca por 24 horas a 40°C, limpa com pincel de cerdas finas e pesada com alta precisão (0,01g). Esse processo rigoroso assegurou a consistência das medições ao longo do experimento.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Além dos testes de biodegradação, foi realizada uma análise quantitativa das partículas das amostras utilizando o software ImageJ. Com ele, foi possível processar imagens antes e após o ensaio de biodegradação, extraindo informações sobre o tamanho e a quantidade de partículas. O uso de parâmetros digitais possibilitou a descrição e interpretação das imagens, permitindo a mensuração precisa do material, baseada na quantidade e tamanho dos pixels, o que contribuiu para uma avaliação detalhada das alterações nas amostras.

Figura 5 - Módulos contendo solo simulado aberto com amostras de TPS (a) e TPS+5%PB (b).



Fonte: Elaboração própria, 2025

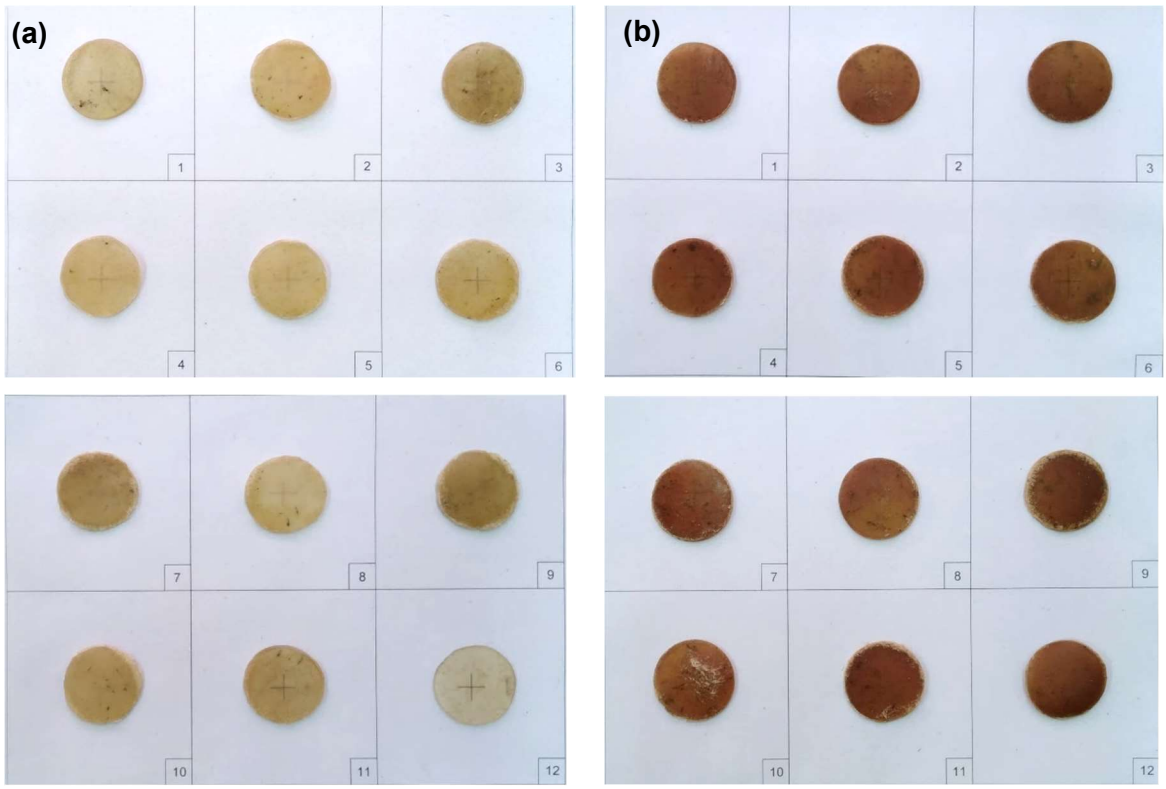
Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Resultados e Discussões

Análise de Biodegradação em Solo Simulado

A Figura 6 mostra a imagem das amostras produzidas em triplicatas e distribuídas de acordo com os períodos de análise ao longo de 4 semanas.

Figura 6 - Amostras de TPS (a) e de TPS+5%PB (b) antes do processo de degradação.



Fonte: Elaboração própria, 2025

O teste de biodegradação em solo simulado foi iniciado no dia 05/08/2022 às 16h00 e finalizado no dia 02/09/2022 às17h40. Desse modo, todas as amostras foram fotografadas e posicionadas, assim como demonstra a Figura 7, de acordo com a semana em que foram retiradas até o fim do ensaio.

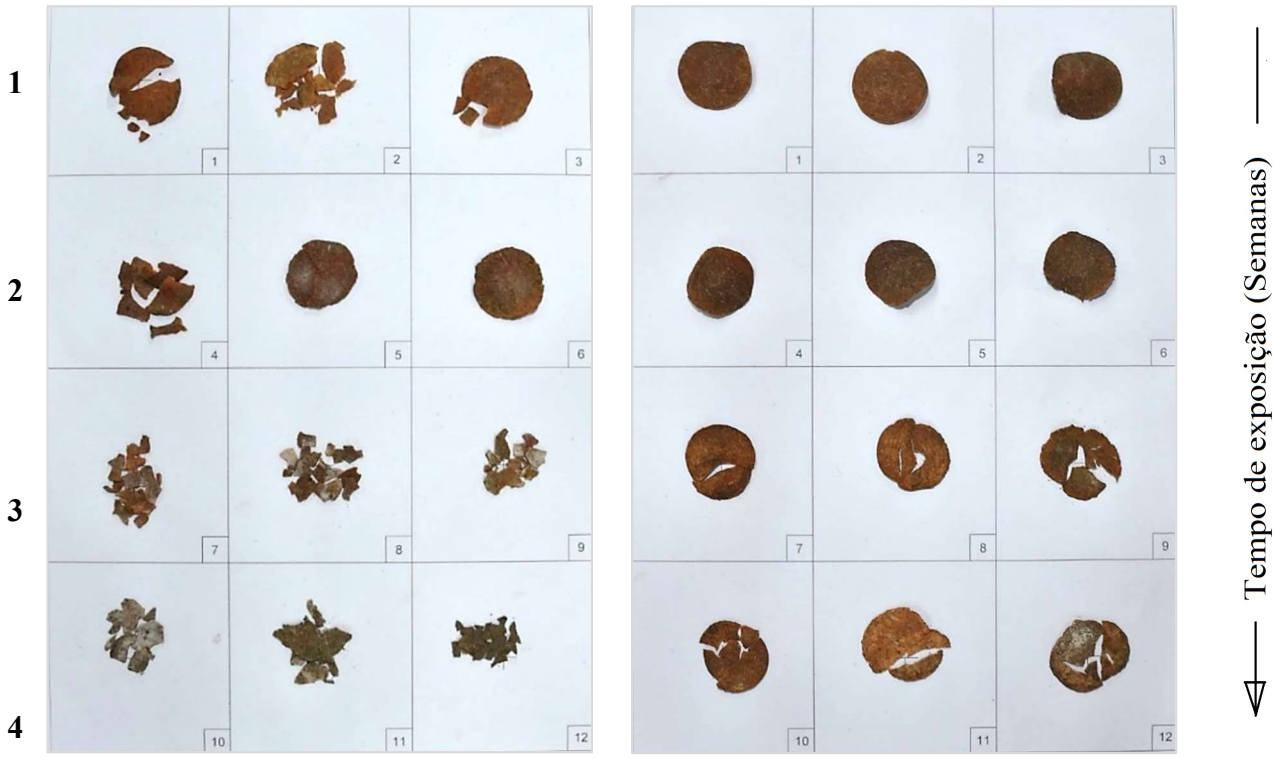
A partir de uma análise visual, é perceptível que as amostra de TPS apresentaram a formação de fungos em sua superfície, além de ficarem mais quebradiças, enquanto as amostras

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

de TPS+5%PB só passaram a desenvolver fungos apenas na última semana do teste e em uma única amostra.

A resistência antimicrobiana do bambu pode ser atribuída a compostos bioativos naturalmente presentes em sua composição, como flavonoides, polifenóis e taninos. Estudos apontam que os flavonoides atuam como inibidores do crescimento de microrganismos devido às suas propriedades antioxidantes, enquanto os polifenóis exercem um efeito direto na desestabilização de membranas celulares de fungos e bactérias, comprometendo seu desenvolvimento (Zhang; Liu; Wang, 2020) (Nossa *et al*, 2025). Os taninos, por sua vez, são reconhecidos por sua ação adstringente, dificultando a adesão e proliferação de microrganismos em superfícies (Li; Chen; Zhao, 2019). A interação desses compostos cria uma barreira química natural que protege o bambu de ataques microbiológicos e, quando incorporados ao TPS, retardam a degradação microbiológica do material compósito.

Figura 7 - Imagens das amostras de acordo com as semanas do ensaio de biodegradação.



-

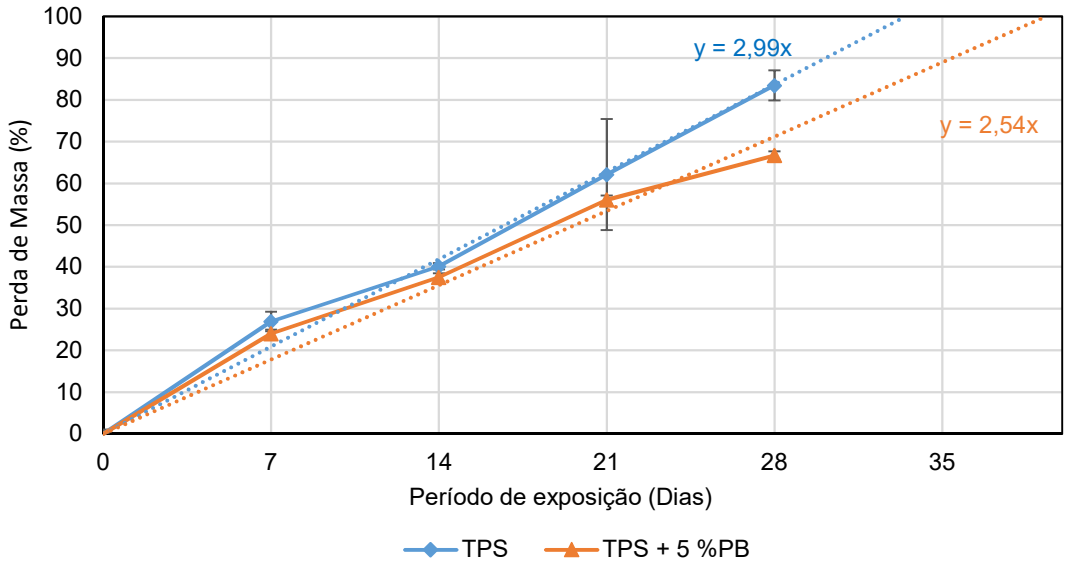
Fonte: Elaboração própria, 2025

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Com base nos dados da pesagem das amostras, foi realizada a quantificação do percentual de perda de massa ao longo de cada semana do teste, utilizando uma regra de três simples, considerando a quantidade de massa inicial exposta de cada formulação. O tratamento e análise desses dados foram realizados com o auxílio do *software* Excel, permitindo a organização e processamento adequado das informações coletadas.

Dessa forma, foi possível representar graficamente na Figura 8, o percentual de biodegradação de cada formulação. Assim, a perda de massa ao longo do tempo foi atribuída à decomposição das amostras e a diferença entre as suas massas, antes e depois do teste, foi utilizada para calcular o percentual de biodegradabilidade (Nossa *et al*, 2025) (Lopes *et al,* 2024). Com base na curva proveniente dos dados apresentados pelas amostras de TPS com incremento das partículas de bambu, foi possível realizar uma comparação detalhada do desempenho de biodegradabilidade entre as formulações, facilitando a análise dos resultados obtidos e permitindo uma comparação objetiva entre os percentuais de degradação das amostras.

Figura 8 – Percentual de perda de massa das amostras ao longo das semanas do Ensaio.



Fonte: Adaptado de Nossa *et al*., 2025

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

De acordo com o gráfico, a curva de biodegradação das formulações seguiu uma tendência linear, indicando uma taxa constante de degradação ao longo do tempo. Esse comportamento foi influenciado pela estabilidade das condições experimentais, como temperatura e umidade controladas, que minimizaram variações externas. A ausência de mudanças ambientais abruptas permitiu uma degradação uniforme e contínua dos materiais, resultando em uma decomposição constante. Como consequência, as barras de erro para cada semana foram relativamente pequenas, indicando alta consistência. No entanto, uma elevação acentuada nas barras de erro foi observada no 21º dia, devido à fragilidade das amostras, o que dificultou sua limpeza e contribuiu para a dispersão de partículas no solo.

Monitoramento do pH

Também foi monitorada a média do pH no solo simulado utilizado ao longo dos 28 dias do teste, utilizando um pHmetro de bancada. O procedimento envolveu a preparação de uma mistura com a proporção de 20:1 (água: solo simulado), sendo o solo retirado de módulos que continham as amostras de TPS e TPS+5%PB. Especificamente, foram adicionados 200 gramas de água (H_2O) para cada 10 gramas de solo, seguindo as diretrizes da norma ASTM D5338 (2021) e realizado em triplicata. Esta norma fornece as especificações detalhadas para a preparação e a análise de amostras de solo, garantindo a consistência e a reprodutibilidade dos resultados, minimizando possíveis variações e garantindo a validade das conclusões derivadas do teste.

Foi possível realizar uma análise detalhada das amostras de solo, através de medições em diferentes pontos para garantir a representatividade dos resultados. Observou-se que as amostras contendo apenas TPS apresentaram um pH médio de 6,8, com um desvio de 4,1%. Esse valor indica uma leve acidez no solo, que pode influenciar a atividade microbiana e a disponibilidade de nutrientes. Por outro lado, as amostras de solo que continham TPS misturado com 5% de PB (Partículas de Bambu) mostraram um pH ligeiramente inferior, em média 6,5, com um desvio de 6,2%. Essa diferença, embora pequena, sugere que a adição de PB pode estar contribuindo para uma leve acidificação do solo.

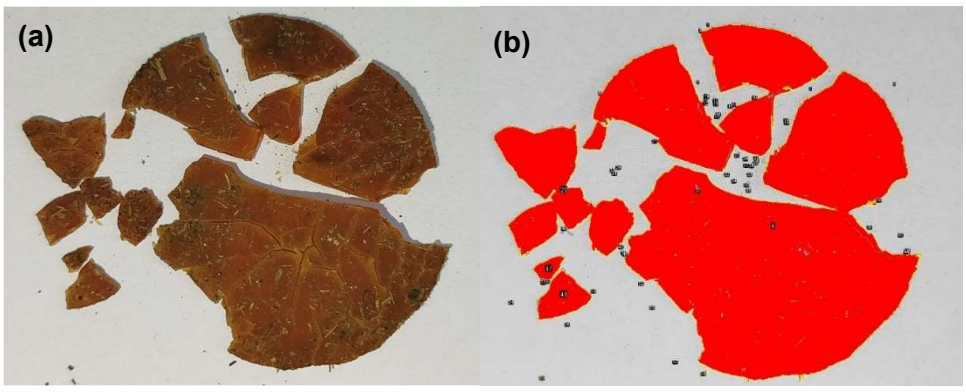
Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

A interpretação dos dados obtidos através do pHmetro, juntamente com a análise visual e a conformidade com a norma ISO 14855-2 (2018), demonstram que o teste realizado é confiável. Os resultados obtidos não apenas estão dentro dos parâmetros exigidos pela norma, como também evidenciam que o pH das amostras se encontra próximo ou superior ao valor de 6,5, que é o mínimo recomendado. Isso confirma a validade e a eficácia do teste, assegurando que os métodos utilizados são adequados para a avaliação da qualidade do solo conforme as diretrizes estabelecidas.

Análise de imagem via ImageJ

O uso do software ImageJ permitiu confirmar as alterações nas amostras durante o processo de biodegradação, possibilitando a medição e quantificação das partículas. A Figura 9a mostra a amostra 1 após o experimento, enquanto a Figura 9b ilustra o procedimento para medir a área superficial com o software. Esse método foi aplicado a todas as amostras, sendo essencial para mensurar a perda de pixels nas superfícies após o teste de degradação. Com isso, foi possível comparar os resultados das amostras pós-teste com as imagens iniciais, permitindo uma análise quantitativa e qualitativa das modificações estruturais.

Figura 9 – Ilustração do mapeamento da área superficial da amostra. Imagem da amostra antes (a) e depois (b) do processamento no *software* ImageJ.



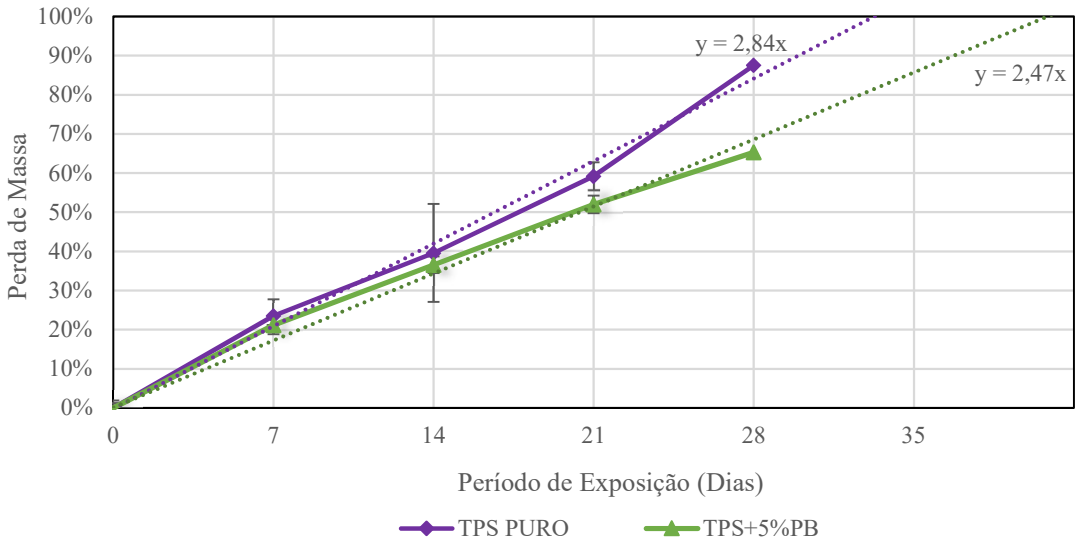
Fonte: Elaboração própria, 2025

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Foi possível calcular o percentual de perda de massa de cada formulação e determinar seu potencial de biodegradação em solo simulado (Santos *et al.*, 2021). Para uma análise mais detalhada e quantitativa da degradação, o *software* ImageJ pode ser utilizado para avaliar visualmente e digitalmente a perda de massa, permitindo assim que os dados pudessem ser devidamente tratados graficamente através do *software* Excel.

Os resultados mostraram uma alta correlação com os dados apresentados na curva de biodegradação gerada através da análise de perda de massa. A Figura 10 ilustra a curva de perda de massa gerada através da análise comparativa em *pixels* das imagens ao longo do tempo.

Figura 10 – Percentual de perda de massa das amostras ao longo do tempo segundo as análises do *software* ImageJ.



Fonte: Elaboração própria, 2025

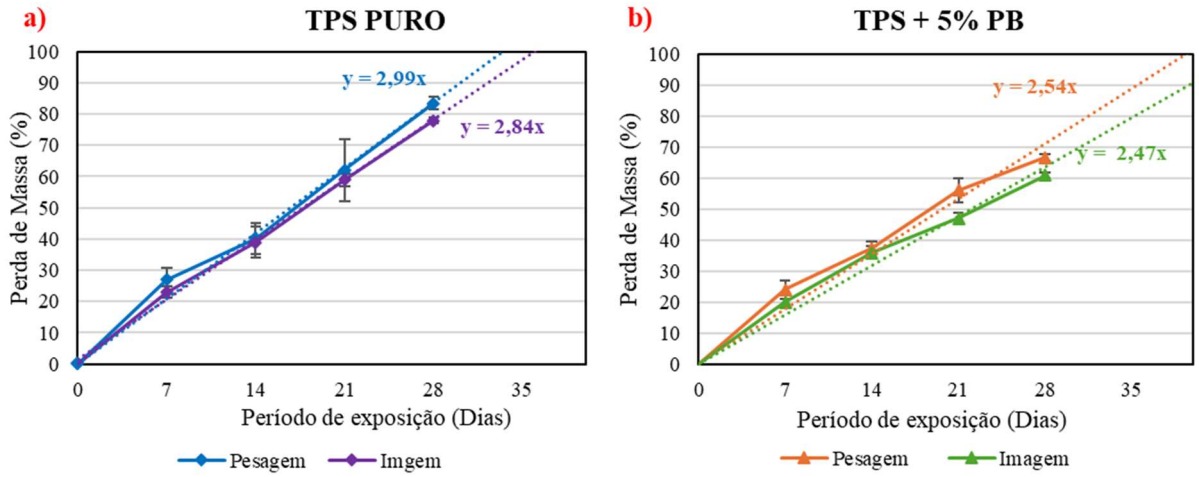
A análise revelou um desvio padrão significativamente alto nas amostras de TPS no 14° dia, indicando uma variabilidade substancial entre as amostras. No entanto, essa discrepância pode ser atribuída à fragmentação observada na amostra número 4. Essa fragmentação dificultou a leitura precisa pelo *software* ImageJ, resultando em uma redução considerável na área quantificada devido à diminuição do número de *pixels* mensurados.

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Análise comparativa de monitoramento da perda de massa x monitoramento de imagem

A fim de se comparar os resultados obtidos, está posto aa a Figura 11, os gráficos de degradação contendo suas respectivas linhas de tendência, representam as duas formas de análise desenvolvidas a partir das duas técnicas de monitoramento da biodegradação em solo simulado: através da perda de massa e por análise de imagem da superfície da amostra via ImageJ. Também é apresentado na Tabela 1, uma comparação entre os dois monitoramentos evidenciando o tempo final de degradação para cada uma das amostras.

Figura 11 – Análise comparativa dos gráficos dispostos pelas amostras de TPS puro (a) e do TPS-5%PB (b) desenvolvidos a partir da análise de massa e imagem.



Fonte: Elaboração própria, 2025

Tabela 1 – Tempo de degradação segundo o monitoramento de imagem e de massa.

Formulação	Equação da linha de tendência		Tempo aproximado para completa biodegradação (dias)	
	Monitoramento de massa	Monitoramento de imagem	Monitoramento de massa	Monitoramento de imagem
TPS	*y = 2,99x*	*y = 2,84x*	*33*	*35*
TPS+5%PB	*y = 2,54x*	*y = 2,47x*	*39*	*40*

Fonte: Elaboração própria, 2025

Revista brasileira de iniciação científica
ISSN: 2359-232X

Houve um aumento no tempo total de biodegradação para o monitoramento por análise de imagem em comparação ao acompanhamento de perda de massa para todas as amostras. Possivelmente, isto ocorreu devido a técnica acompanhar somente a área superficial e não levar em consideração o acompanhamento em termos de volume.

A diminuição superficial das amostras, é consistente com a ação de bactérias e fungos que atacam o material ao longo do tempo, promovendo a decomposição e a redução gradual da sua massa (Smith; Brown; Davis, 2018). Essa dinâmica ressalta a eficácia das partículas de bambu em conferir maior estabilidade à área superficial das amostras, enquanto a espessura é progressivamente afetada pela biodegradação. Esse fator justifica uma maior discrepância para as duas técnicas para o TPS puro (33-35 dias), enquanto que na presença das partículas de bambu o TPS-5%PB apresentou uma estimativa do tempo de degradação muito próxima (39-40 dias).

A adição de partículas de bambu nas amostras contribuiu positivamente para a resistência à degradação e fragmentação, reduzindo a taxa de diminuição da área superficial ao longo do tempo. O TPS puro, por sua vez, degrada-se rapidamente, o que limita sua aplicação em contextos que exigem maior durabilidade. As fibras de bambu atuaram como uma barreira física, retardando a degradação acelerada. Esse comportamento é corroborado por estudos que demonstram que a incorporação de aditivos naturais, como fibras vegetais, pode melhorar a resistência dos materiais à degradação microbiana e física (Zhang; Liu; Wang, 2020) (Li; Chen; Zhao, 2019).

A análise do gráfico comparativo revelou um padrão consistente entre as curvas de biodegradação. A semelhança nas inclinações das linhas de tendência sugere que ambos os métodos de análise, tanto o ensaio de biodegradação por monitoramento de massa, quanto a análise de imagens pelo ImageJ, capturaram de forma eficaz a mesma dinâmica de degradação das amostras. Essa consistência nas inclinações das curvas pode significar que o processo de biodegradação seguiu uma trajetória relativamente uniforme, independentemente das variações potenciais nos métodos de análise. Esse alinhamento entre as linhas de tendência e a pouca variação nas equações das retas reforça a validade dos métodos utilizados e a confiabilidade dos dados obtidos.

A capacidade de correlacionar e comparar os resultados de diferentes abordagens metodológicas é fundamental para assegurar uma compreensão abrangente do comportamento das amostras de TPS puro ao longo do tempo, Figura 11(a), permitindo conclusões mais robustas sobre o processo de biodegradação.

Na Figura 11(b), observa-se que as curvas das amostras com fibra de bambu tratada são semelhantes, com exceção das amostras no 21° dia do teste. Essa diferença ocorreu devido à fragmentação das amostras, que, apesar de manterem a perda de massa constante, apresentaram áreas reduzidas, dificultando a coleta de pixels analisados pelo ImageJ. Nesse ponto, as amostras tornaram-se mais frágeis e quebradiças. Estudos sugerem que esta fragmentação é causada por estresse físico e interações ambientais, o que afeta a consistência das medições e a precisão das análises (Santos; Oliveira; Mendonça, 2021) (Almeida; Bastos; Costa, 2019).

Considerações Finais

Considerando os diversos aspectos e dados analisados, torna-se evidente que as técnicas de caracterização de biodegradação envolvem uma gama significativa de variáveis. Esta complexidade multifacetada ressalta a necessidade imperativa de um controle rigoroso e da parametrização precisa dos processos nos ensaios de biodegradação. A variedade de técnicas e a multiplicidade de etapas utilizadas podem introduzir erros e incertezas. Portanto, é essencial minimizar essas falhas para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Nesse contexto, a definição e padronização das técnicas empregadas foram fundamentais. A parametrização adequada contribui para a consistência dos resultados dentro do projeto e estabelece um padrão que pode ser amplamente adotado pela comunidade científica, promovendo avanços em pesquisas futuras.

A análise das amostras revelou uma taxa de degradação robusta e consistente com as expectativas teóricas e práticas, evidenciando a eficácia dos micro-organismos e das condições ambientais simuladas para promover a biodegradação dos materiais orgânicos.

Os dados demonstraram uma degradação eficiente e uniforme ao longo do período de monitoramento, refletindo a adequação do modelo experimental para simular processos reais de biodegradação em solo. Esses resultados validam o método empregado no laboratório do

IFSP campus Itapetininga e fornecem uma base sólida para futuras investigações e aplicações práticas.

A integração do ImageJ na análise da biodegradação de amostras em solo possibilitou uma quantificação precisa e eficiente das mudanças nas amostras contribuindo para uma melhor compreensão dos processos de biodegradação superficial das amostras ao longo do teste. A combinação de uma parametrização rigorosa, testes experimentais eficazes e a utilização de ferramenta, como o ImageJ e Excel, demonstrou ser crucial para gerar dados precisos e relevantes, fortalecendo o entendimento dos processos de biodegradação e aprimorando as técnicas empregadas no Laboratório de Biopolímeros do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Itapetininga.

Agradecimentos

Ao Eng. Nicolas Motta pelo desenvolvimento das formulações de compósitos de fibra de bambu via extrusão reativa. À Profa. Dra. Juliana Cortez Barbosa, da Universidade Estadual Paulista (UNESP Campus Itapeva) pelo fornecimento das fibras de bambu. À CAPES pelo financiamento da bolsa de iniciação científica que serviu de suporte para o desenvolvimento do trabalho atual.

Referências

ALMEIDA, Célio Miguel Ribeiro; BASTOS, Rafael Kiyoshi; COSTA, Marcos Gonçalves. Effects of physical degradation on the performance of biodegradable polymers. **Polymer Testing**, v. 77, p. 105866, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Methods of Identification and Quantitative Analysis of Synthetic Elastomers,** *ASTM D833*. Pensilvania, 1946. 8 p.

CARSON, Hugo Stephen; *et al.* Synthesis and characterization of a novel biodegradable polymer from renewable resources. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 48, n. 5, p. 610-617, 2013.

FRIES, Eva; ZARFL, Claudia; & WAGNER, Michael. Toxicological risks of microplastics to the environment and human health. **Environmental Science and Technology**, 50(4), 1464-1473, 2016.

FUNABASHI, Masahiro; NINOMIYA, Fumi; KUNIOKA, Masao. Biodegradability Evaluation of Polymers by ISO 14855-2. **International journal of molecular sciences**. 10. 3635-54. 10.3390/ijms10083635, 2009.

GALLOWAY, Tamara Susan; COLE, Mark; LEWIS, Carl. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. **Nature Ecology & Evolution**, 1(5), 116, 2017.

GESAMTSTUDIE. Impact of microplastics on marine ecosystems. **Marine Pollution Bulletin**, v. 151, p. 110815, 2020.

JANSEN, Lars. *et al.* Biodegradable plastics and their environmental impact. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 8, p. 4235-4244, 2017.

KERSCHNER, Carla Maria. *et al.* Microplastics and their effects on marine organisms. **Marine Environmental Research**, v. 112, p. 31-40, 2015.

LESLIE, Heather Anne. *et al.* Human exposure to microplastics through direct and indirect pathways. **Nature Reviews Materials**, 7(1), 35-46, 2022.

LI, Hao.; CHEN, Yan.; ZHAO, Shu. The role of tannins in natural plant resistance against microbial infections. **Plant Biochemistry and Microbiology**, v. 27, n. 4, p. 210–224, 2019.

LI, Yan; MCLACHLAN, Mark. A simple field-based biodegradation test shows pH to be an inadequately controlled parameter in laboratory biodegradation testing. **Environmental Science: Processes & Impacts**, v. 22, p. 1006–1013, 2020.

LIU, Zhu.; WANG, Chen.; JIANG, Jian. Biodegradation and mechanical performance of natural fiber composites. **Composites Science and Technology**, v. 183, p. 107761, 2019.

MIZOGUCHI, Naoko. Environmental impact of synthetic polymers and solutions. **Journal of Environmental Management**, v. 248, p. 109266, 2019.

MORAES, André Paulo *et al.* Degradation of biodegradable polymers in simulated soil environments. **Polymers**, v. 14, n. 6, p. 1337, 2022.

MORAES, Carolina Cristine *et al.* Biodegradation study of food packaging materials: Assessment of the impact of the use of different biopolymers and soil characteristics. **Polymers**, v. 16, n. 20, p. 2940, 2024.

MOTTA, Nícolas Albertino Motta. **Desenvolvimento de material compósito de fonte renovável produzido a partir do milho e bambu**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Instituto Federal de São Paulo, Itapetininga, 2023.

NOSSA, Tamires de Souza; *et. al.* Thermoplastic Starch reinforced with Bamboo Fibers: A Biodegradable Composite Alternative produced in a homemade extruder. **Polymer Bulletin**, 2025. (Submetido para publicação).

PELLETIER, Claude André. *et al.* Economic aspects of polymer production and use. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 11, p. 2807-2815, 2016.

RAAGHUIS, Jaap. *et al.* Detection of microplastics in human lung tissue. **Science of the Total Environment**, 785, 147-154, 2021.

RODRIGUES, David. *et al.* Properties and applications of common polymers. **Polymer Science**, v. 54, n. 4, p. 635-644, 2016.

RUIZ, José Antônio *et al.* Biodegradation of starch-based polymers in natural environments. **Journal of Polymers and the Environment,** v. 29, n. 3, p. 800-812, 2021.

SANTOS, Alexandre Alves; OLIVEIRA, João Ricardo; MENDONÇA, Vitor Silva. Influence of material fragmentation on the accuracy of biodegradation measurements. **Journal of Environmental Management**, v. 277, p. 111492, 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111492.

SANTOS, Alexandre; *et al.* Evaluation of biodegradable plastics: A comparative study. **Journal of Hazardous Materials**, v. 404, p. 124060, 2021.

SILVA, Francisco Felipe; *et al*. Biodegradability of polymers: Mechanisms and methods. **Biodegradation,** v. 31, n. 4, p. 421-434, 2020.

SMITH, Robert; BROWN, Thomas; DAVIS, Michael. Microbial degradation of biocomposites: An overview. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 15, p. 8541-8554, 2018.

SOBRAL, José. Biodegradable polymers: Development and environmental considerations. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 72, n. 1, p. 1-20, 2011.

ZHANG, Yu; *et al*. Degradation of biodegradable polymers under different environmental conditions. **Polymer Degradation and Stability**, v. 166, p. 152-160, 2019.

ZHANG, Yu; LI, Jian; WANG, Yifan; WANG, Xiang. Antimicrobial properties of bamboo bioactive compounds: Mechanisms and applications. **Journal of Biomaterials Research**, v. 35, n. 2, p. 123–135, 2020.

ZHANG, Ying; LIU, Xiaomei.; WANG, Lei. Influence of natural fiber reinforcement on the mechanical properties and biodegradability of composite materials. **Journal of Composite Materials**, v. 54, n. 7, p. 927-945, 2020.