

BIOPROSPECÇÃO PARA PRODUÇÃO DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DA BORRA DE CAFÉ

Professora orientadora: Anabele Azevedo Lima
Barbastefano

Alunas: Júlia Monteiro Silva e Anna Beatriz
Domingas da Silva

PROGRAMA DE
INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIC/CEUB

RELATÓRIOS DE PESQUISA
VOLUME 10 Nº 1- JAN/DEZ
2024



**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE BRASÍLIA - CEUB
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

**JÚLIA MONTEIRO SILVA
ANNA BEATRIZ DOMINGAS DA SILVA**

**BIOPROSPECÇÃO PARA PRODUÇÃO DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DA BORRA
DE CAFÉ**

Relatório final de pesquisa de Iniciação Científica apresentado à Assessoria de Pesquisa e Extensão.

Orientação: Dra Anabele Azevedo Lima Barbastefano

**BRASÍLIA
2025**

DEDICATÓRIA

Dedicamos o nosso trabalho a todas as pessoas especiais que estiveram com a gente durante esse processo e principalmente, a nossa professora e orientadora Anabele Azevedo Lima Barbastefano, por ter nos dado essa chance, pelo incentivo e todos os momentos imprescindíveis de ajuda, esse trabalho definitivamente não teria sido o mesmo sem você. Muito obrigada!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a nossa orientadora e professora Anabele Barbastefano por nos apresentar essa oportunidade, e a partir desta começamos a nos encantar pelas possibilidades que esse tema nos proporciona, além disso agradecemos a nossa instituição de ensino por nos permitir a realização do projeto. Ademais, também gostaríamos de agradecer o importante o apoio de ambas famílias, amigos, professores, estes responsáveis por cessar muitos anseios e dúvidas e principalmente colaboradores importantes, como nosso amigo Felipe Reis, responsável por disponibilizar um dos principais materiais utilizado na pesquisa a (Kombucha), o responsável técnico do laboratório, Lula que sempre esteve disposto a os auxiliar em todos os testes, proporcionar diversos materiais que auxiliaram ao longo deste ano de pesquisa, e principalmente assegurar a integridade das nossas amostras. Muito obrigada a todos que fizeram parte desse importante processo, sem o apoio de vocês nada disso seria possível, somos muito gratas por cada um de vocês.

“Não há descoberta sem risco, e o maior risco é não tentar”

(Albert Einstein)

RESUMO

Com o passar dos anos, foi observado um grande aumento da produção de plástico mundial e, este acúmulo está relacionado a sua dificuldade de degradação, pois gera muitos resíduos que são poluentes para a população e para o meio ambiente, como por exemplo o microplástico, e ainda a degradação de ecossistemas, principalmente os marinhos. Neste sentido, buscando uma alternativa que seja sustentável, o objetivo da presente pesquisa foi confeccionar um tipo de bioplástico, a partir da borra de café, que seja degradado naturalmente no ambiente e que atenda as mesmas funcionalidades de um plástico convencional de origem do petróleo. Para isso, fez-se a aquisição de borras de café e outros compostos para se obter diferentes produtos que se assemelham aos aspectos esperados de um plástico convencional. Além disso, testou-se alguns parâmetros dos produtos obtidos quanto à resistência em diferentes temperaturas, a solubilidade em água, a dureza e os aspectos de decomposição. Foi possível obter diferentes tipos de insumo de bioplástico promissores em relação aos aspectos morfológicos, resistência, dureza e flexibilidade. Desenvolvemos biotecnologia com potencial para se tornar uma alternativa ao uso de plástico de origem fóssil, embora testes mais minuciosos devam ser repetidos e concluídos. A depender do tipo de objeto de interesse, os insumos produzidos neste trabalho podem servir como base sustentável, apresentando relevância científica, social, econômica e ambiental.

Palavras-chave: bioplástico; borra de café; alternativa sustentável.

SUMÁRIO

1	Introdução	7
1.1	Contextualização da pesquisa	8
1.2	Objetivos	9
1.2.1	Objetivo geral	9
1.2.2	Objetivos específicos	9
2	Fundamentação teórica	10
2.1	O plástico de origem fóssil e o meio ambiente	
2.2	Bioplástico versus plástico biodegradável	
2.3	Das alterações climáticas	
2.4	Princípios da economia circular	13
2.5	Aplicações industriais e o mercado de bioplástico	
2.6	Borra de Café como fonte de compostos bioativos	
3	Método	15
3.1	Instrumentos de coleta de dados	18
3.2	Procedimentos metodológicos	
3.2.1	Temperatura	
3.2.2	Cisalhamento	19
3.2.3	Solubilidade	
3.2.4	Decomposição	
4	Resultados e discussão	
4.1	Bioplásticos produzidos	20
4.2	Avaliação dos bioplásticos produzidos	
5	Considerações finais	25
	REFERÊNCIAS	26

1 Introdução

Polímeros sintéticos convencionais, produzidos a partir de derivados do petróleo, são amplamente utilizados pela sociedade devido às suas características de baixo peso específico (leveza), não toxicidade, elevada resistência mecânica e baixos custos de produção e processamento (REIS,2017). Todavia, estes polímeros são rapidamente descartados e, por não serem biodegradáveis, seu acúmulo gera grandes volumes de resíduos no meio ambiente.

A produção anual de plástico no mundo é superior a 380 milhões de toneladas, com previsão de crescimento de 4% a cada ano.(OECD , 2022). Cerca de 6.300 milhões de toneladas de resíduos plásticos foram gerados desde 1950. O que gera um alerta mundial, visto que é cada vez maior o impacto ambiental dos resíduos plásticos, assim como, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) relacionada a sua produção.

Embora a maioria dos plásticos comerciais sejam feitos de recursos fósseis (petróleo), estes materiais também podem ser feitos a partir de recursos renováveis, e são comumente referidos como biofilmes ou bioplásticos. Neste caso, os monômeros são extraídos ou sintetizados a partir de compostos de biomassa (como os açúcares nas plantas), e então polimerizado, em substituição a um plástico convencional, como o polietileno (PE), ou como polihidroxicanoatos (PHAs).(CANEVAROLO, 2010). Sendo assim, as propostas para produção de bioplásticos visam plásticos compostos de recursos renováveis, que sejam biodegradáveis, e produzidos por meio de processos biológicos, ou uma combinação destes.

Atualmente, os bioplásticos 100% de origem biológica são produzidos em uma escala de aproximadamente 2 milhões de toneladas por ano, e são considerado uma parte das futuras economias circulares para ajudar alcançar alguns dos objetivos sustentáveis estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), a fim de evitar fósseis, introduzindo alternativas de reciclagem ou degradação, além de usar reagentes e solventes menos tóxicos em processos de produção. (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

Uma alternativa que vem sendo estudada é a utilização de borras de café (BC), ou seja, grãos de café torrados e moídos e que foram solubilizados em água. São os resíduos sólidos obtidos após o preparo da bebida do café, e podem ser encontrados

em diversos locais, incluindo residências e estabelecimentos comerciais que servem café.

O café é a segunda bebida mais consumida no mundo, não superando o chá (CHARMAS, 2022). Todo esse consumo gera grande quantidade de borra de café que, em sua maioria, é descartada em aterros sanitários de grandes centros urbanos. Portanto, o descarte da BC pode impactar no meio ambiente pois são jogados diretamente no lixo, e assim, em sua maioria, acabam em lixões, sendo altamente poluentes devido à quantidade significativa de substâncias orgânicas que demandam grande quantidade de oxigênio para se decompor.

A borra de café é composta de partículas constituídas principalmente de celulose, hemicelulose e lignina, o que lhe confere propriedades funcionais, como capacidade de retenção de água, retenção de óleo, atividade emulsificante, estabilizante de emulsões e potencial antioxidante (SHAHABI-GHAHFAROKHI, 2022).

Seguindo este pressuposto, a pesquisa buscou produzir diferentes manipulações, extrações e testagem de bioplásticos a partir de borras de café, obtidos por meio de parceria com empresas que comercializam a bebida do café, além de analisar suas propriedades sustentáveis.

1.2 Objetivos:

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver materiais de consumo, do tipo bioplástico, a partir de polímeros naturais presentes na borra de café, além de outros compostos necessários para sua confecção como uma alternativa ao uso de plástico de fonte não renovável.

1.2.2 Objetivos específicos

- Adquirir borras de café (secas e úmidas).
- Testar diferentes concentrações de borra de café para produzir bioplástico.
- Ajustar as concentrações dos outros compostos necessários para a produção do bioplástico, como exemplo as fibras, a fim de se estabelecer o produto final.

- Avaliar a influência das temperaturas nos produtos obtidos, assim como, suas possíveis alterações.
- Analisar os aspectos de solubilidade, resistência a cisalhamento e decomposição.

2 Fundamentação teórica

2.1 O plástico de origem fóssil e o meio ambiente

A poluição plástica ambiental tornou-se uma prioridade de grandes entidades globais, incluindo a ONU (ISHWARYA, 2021; DA SILVA, 2022), o Fórum Econômico Mundial (FEM), (NGUYEN, 2021), a Organização Mundial da Saúde (LEE, 2022) e a União Europeia (UE), (BLOCK, 2021). A indústria de plásticos tradicionalmente implementou processos lineares focados na extração de matérias-primas que convertam em produtos úteis, ao invés de reciclar ou reutilizar produtos (KIM, 2020; SODHI, 2022).

A produção global de plásticos não fibrosos, desde 1950, é dominado polietileno (PE;36,4%), polipropileno (PP; 21%) e cloreto de polivinila (PVC; 12%), enquanto o mercado de fibras compreende em grande parte tereftalato de polietileno (PET; 70%). Os maiores volumes globais de plástico foram dos setores de embalagens (35,9%), de construção (16,0%), têxteis (14,5%) e de bens de consumo (10,3%) (CRUZ, 2014). Como exemplo, as indústrias automotiva, eletrônica e agrícola também usam quantidades consideráveis de plástico (10,1%, 6,2% e 3,4%, respectivamente, na UE em 2016) (BLOCK, 2021; SODHI, 2022; CHARMAS, 2022).

A embalagem plástica é considerada a maior fonte de resíduos, com 146 milhões de toneladas produzidas em 2015, das quais 141 milhões de toneladas não foram recicladas (96,6%). A embalagem também tende a ter a vida útil mais curta em todos os setores industriais utilizadores de plásticos (CRUZ, 2014). A vida útil do plástico, desde o uso até o descarte, pode ser curta ou levar alguns minutos. Devido à má gestão de resíduos, cerca de 1 a 5% de todo o plástico acaba como resíduo em ambientes terrestres e, predominantemente, nos oceânicos. Aproximadamente 80% do plástico oceânico vêm da terra, geralmente de aterros sanitários e calçadas que são saqueados pelas marés do mar e pelo vento (ISHWARYA, 2021; NGUYEN, 2022).

Cerca de dois milhões de toneladas de lixo plástico lixiviam para os rios a cada ano, ocorrendo tanto em países em desenvolvimento como em países que carecem de infraestrutura adequada de coleta e de tratamento de resíduos (NGUYEN, 2022; VAHABI, 2021). Este problema é amplificado pelo 'despejo externo' – isto é, plástico enviado de países mais ricos a nações com infraestruturas e regulamentos de gestão de

resíduos inferiores, precários ou ausentes (DA SILVA, 2022; ISHWARYA, 2021; L.I, 2021; MENDES,2022). As Emendas sobre Resíduos Plásticos da Convenção da Basiléia, que visam regular o comércio global de resíduos plásticos vêm sendo abordadas pelos estados membros da ONU desde 2019 (LACHHEB, 2019; CHEN, 2022).

Nos ambientes oceânicos, o plástico e o microplástico (que varia de 1 a 5 mm de tamanho) submerso podem sufocar a vida marinha. Estas partículas microplásticas podem ser encontradas na água da torneira, no ar, em peixes e no sal (LEE, 2022; CHEN, 2022; GUO, 2022). São potencialmente prejudiciais devido à sua natureza química e podem absorver e carregar contaminantes, como aditivos e produtos químicos orgânicos hidrofóbicos (RIBEIRO, 2021).

Embora os níveis de microplásticos na água doce sejam considerados baixos para serem nocivos (LEE, 2022; RIBEIRO, 2021; BADR, 2022), eles podem ter efeitos deletérios em nível molecular quando em altas concentrações. Minhocas, anfípodas, ostras e caranguejos expostos podem ter o crescimento prejudicado, desenvolver processo inflamatório e reduzir capacidade fisiológica (COSTABILE, 2018; SEDAGHAT, G 2019; ALAMRI, 2020).

A poluição plástica também tem um alto custo: só na região da Ásia-Pacífico, o dano econômico ao turismo, pesca e navegação indústrias é estimado em US \$1,3 bilhão por ano. Além disso, a pandemia da COVID-19 exacerbou o “problema do plástico”, criando uma demanda urgente por produtos descartáveis e equipamentos de proteção individual de plástico, como máscaras, luvas e protetores faciais. Várias proibições de plástico de uso único foram temporariamente revertidas, sacolas reutilizáveis foram proibidas e, em alguns lugares, recipientes de plástico tradicionalmente recicláveis para alimentos foram considerados perigosos, devido à potencial contaminação patogênica (ZHU, 2022). Consequentemente, a quantidade de resíduos plásticos médicos aumentou de 3 a 10 vezes além das capacidades locais de tratamento de resíduos em alguns países (ZHU, 2022).

No entanto, como disse o secretário-geral da ONU, António Guterres, "a recuperação pandêmica é a nossa chance de mudar", por meio de políticas e investimentos em tecnologias (ONU,2020).

2.2 Bioplástico versus plástico biodegradável

Os termos "bioplásticos" e "plásticos biodegradáveis" surgiram quando as indústrias de plásticos começaram a tentar torná-los mais sustentáveis, principalmente quando, mundialmente, as estruturas dos plásticos e seus impactos no meio ambiente passaram a ser reconhecidos, tornando-se preocupantes devido ao seu tempo de decomposição.

Segundo os critérios do World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), os bioplásticos são mais ecoeficientes por substituírem a matéria-prima derivada do petróleo por outras derivadas do etanol da cana-de-açúcar, por exemplo, mantendo a durabilidade e o potencial de reciclabilidade. Já os plásticos biodegradáveis usam matéria-prima de fonte renovável; no entanto, têm composição derivada de petróleo e alguns até de metais pesados, o que, em conjunto com as emissões de gás carbono e/ou metano decorrentes do processo de biodegradação, não atende aos critérios de ecoeficiência.

O termo "ecoeficiência" foi criado em 1992 pelo WBCSD e apresenta uma estratégia de gestão com o objetivo de minimizar o impacto ambiental na produção de bens e serviços (Business Council for Sustainable Development Portugal (BCSD), 2013).

Segundo o WBCSD (2006, p. 3):

“A ecoeficiência é alcançada pela entrega de bens e serviços a preços competitivos que satisfaçam as necessidades humanas e tragam qualidade de vida, enquanto progressivamente reduz os impactos ecológicos e a intensidade de consumo de recursos ao longo do ciclo de vida para um nível em linha com a capacidade estimada de suporte da Terra”.

Para alcançar esses objetivos, o WBCSD (2001) identificou sete aspectos que podem contribuir para a ecoeficiência:

- a) Redução do consumo de materiais para a produção de bens e serviços;
- b) Redução na quantidade de energia utilizada para a produção de bens e serviços;
- c) Redução da dispersão de substâncias tóxicas;
- d) Aumento da reciclabilidade dos materiais;
- e) Utilização de recursos renováveis;

- f) Prolongamento do ciclo de vida (durabilidade) dos produtos;
- g) Agregação de valores aos bens e serviços.

Nem sempre é possível aplicar todos esses itens, tampouco em todos os produtos, processos e serviços. As tendências são: a adoção da sustentabilidade, a química verde, a produtividade radical dos recursos, a ecologia industrial e a biomimética. Esse esforço tem sido observado na indústria dos plásticos, com o surgimento de uma grande variedade de bioplásticos e plásticos biodegradáveis.

Como sabemos, o plástico é produzido a partir de derivados do petróleo e caracteriza-se por ser um material inerte e não biodegradável, resultando em um grande problema ambiental quando descartado incorretamente, visto que pode levar mais de uma centena de anos para se degradar (MAGRINI, 2012). Por outro lado, é um material versátil, leve, resistente, reutilizável, reciclável e de baixo custo (MASCARENHAS, 2020), sendo um dos principais componentes para a produção de peças simples até as mais complexas, como aviões.

Para tornar o plástico um produto ecoeficiente, há um esforço para desenvolver eco-inovações capazes de diminuir seu impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida, através da substituição de matérias-primas e/ou da combinação de materiais, tornando-os degradáveis.

Os bioplásticos, também denominados plásticos verdes, são produzidos “a partir de matérias-primas de fontes renováveis” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2008), como milho, cana-de-açúcar, entre outros. No Brasil, o plástico verde caracteriza-se pela substituição do eteno derivado do petróleo pelo obtido a partir do etanol, produzido a partir da cana-de-açúcar (BRITO, 2011). O plástico verde possui as mesmas propriedades físico-químicas do plástico derivado do petróleo, portanto, não é biodegradável, porém é reciclável (MAGRINI, 2012).

Vale destacar que o processo de reciclagem pode consumir até 43% menos energia que a produção de um plástico virgem (MAGRINI, 2012), o que constitui uma grande vantagem em termos de eficiência energética.

Já os plásticos biodegradáveis, que possuem como característica a degradação a partir da ação de micro-organismos naturais, tais como bactérias, fungos e algas (ASTM, 2004 ; BRITO, 2011), podem ser obtidos a partir de derivados do petróleo, de fontes naturais renováveis (milho, cana-de-açúcar, etc.), ou de derivados de fonte animal (quitina, quitosana ou proteínas) (MOHANTY e RAY , 2005 ; BRITO, 2011), ou, ainda, da combinação entre amido (derivado do milho, arroz ou mandioca) com derivados petroquímicos, denominados plásticos hidro-biodegradáveis (ECOSIGMA, 2011).

O processo de biodegradação pode ocorrer tanto na presença de oxigênio (aeróbio) quanto na ausência (anaeróbio) (ABNT, 2008), o que implica em impactos ambientais diferentes. A biodegradação aeróbica, típica dos plásticos compostáveis, resulta em CO₂, água (H₂O) e biomassa (adubo). Já a biodegradação anaeróbica, que ocorre nos plásticos hidro-biodegradáveis, através da ação da água, resulta em CO₂, H₂O, biomassa (adubo) e em quantidades significativas de CH₄ (BASTIOLI, 2005), gás de efeito estufa 21 vezes pior que o CO₂ (BARBIERI, 2007).

Há ainda outros tipos de plásticos produzidos a partir de fontes renováveis: os foto-biodegradáveis, que se degradam duas vezes mais rápido sob a ação da luz do que os plásticos biodegradáveis derivados do petróleo, e os amidos termoplásticos, que são produzidos a partir de polissacarídeos obtidos a partir do milho, arroz ou mandioca, e são compostáveis (ABNT, 2008).

Neste sentido, dependendo do foco da tecnologia adotada pelas diferentes eco-inovações, os bioplásticos e os plásticos biodegradáveis produzem diferentes impactos ao longo dos seus ciclos de vida, quer pela composição da matéria-prima (renovável ou não), quer pelo processo de destinação final (reciclável ou biodegradável), quer pela toxicidade dos seus componentes (MASCARENHAS, J. M. G. A., 2020).

Diante do contexto acima, é importante ressaltar que no comércio não existe uma padronização e fiscalização global sobre práticas de soluções sustentáveis, e, infelizmente, acaba ocorrendo *greenwashing*, ou seja, em geral, o *marketing* promove um produto como ecológico, mas que não é. Além disso, Maria Tereza Freire, professora da FZEA-USP, alega que existe uma certa dificuldade conceitual entre os termos "bioplásticos", "*bio-based*" [baseado em biomassa, segundo a International

Union of Pure and Applied Chemistry – IUPAC], "biodegradável" e "compostável". Um plástico pode ser de origem biológica ou de base biológica; no entanto, não precisa ser necessariamente biodegradável e/ou compostável.

Outro fator importante é a associação do prefixo "Bio" a um material que pode induzir o consumidor a comprá-lo por ser uma ação sustentável, que às vezes não é, assim demorando no seu processo de degradação e gerando microplásticos, ou pode vir até de uma fonte renovável, porém precisa de condições bem específicas para a degradação.

Para tornar o plástico um produto ecoeficiente, há um esforço para desenvolver eco-inovações capazes de diminuir seu impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida através da substituição de matérias-primas e/ou da combinação de materiais, tornando-os degradáveis.

2.3 Das Alterações Climáticas

A atividade humana tem impulsionado o aquecimento do planeta e aumento das condições climáticas extremas, principalmente enraizadas na emissão de gases efeito estufa (GEEs) através da exploração de recursos fósseis, como CO₂ e CH₄. A produção de plástico consome cerca de 5 a 7% da oferta global de petróleo e liberou 850 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera em 2019, representando 2% do a produção global de CO (GAZONATO, 2019).

As emissões de CO₂ são incorridas pela extração de matéria-prima (61%) e produção de polímeros (30%), enquanto apenas 9% é associado ao estágio de fim da energia útil (EOL), principalmente a incineração (THIAGAMANI, 2017). A queima a céu aberto não documentada de resíduos plásticos pode adicionar 1Gt de emissões de CO₂.

Simulações sugerem que a substituição completa de fósseis matérias-primas com cana-de-açúcar reduziram as emissões de GEE em ~25%; reciclar todos os plásticos existentes poderia ter um efeito semelhante. Como a maior pegada de carbono dos plásticos está associada à produção, modificar processos existentes a um suprimento de energia renovável reduziria os custos do plástico relacionados a emissões em 62%. Estas medidas, juntamente com metade consumo, reduziria os

níveis atuais em 93% (TERROBA-DELICADO, 2022), sugerindo que essas quatro mudanças sistemáticas precisam atuar em conjunto para mitigar efetivamente as emissões.

Por outro lado, as capacidades plásticas petroquímicas estão crescendo, com mais de 300 novos projetos industriais (com valor superior a US \$200 bilhões) anunciados desde 2010 nos EUA, dos quais cerca da metade estão em fase de construção ou conclusão. Esse crescimento pode levar à produção e incineração de plástico, gerando 2,8 Gt de emissões de CO₂ até 2050. Esses níveis representam 15% do orçamento de carbono global estimado da produção de CO₂ para manter o aquecimento global abaixo de 2°C, que é a meta estabelecida no Acordo de Paris da ONU de 2015 (KAMIL, 2019; HSIEH, 2021; SODHI, 2022).

2.4 Princípios da economia circular

Em uma economia circular ideal, os plásticos seriam produzidos de recursos renováveis ou reciclados. No entanto, a vida tradicional da maioria dos materiais plásticos é linear: 79% de todo o plástico produzido é descartado em aterros sanitários ou atinge o meio ambiente, enquanto o restante é incinerado (12%) ou reciclado (9%).

Embora a reciclagem tenha aumentado desde 1980, a reciclagem de plástico não fibroso permanece estagnada em 18% e quase nenhuma fibra têxtil é reciclada (CRUZ, 2014; SOLOMAKOU, 2022). A falta de progresso é, em grande parte, devido às limitações da forma dominante de reciclagem - reciclagem mecânica - que converte resíduos plásticos em novas formas através de força mecânica e calor. A qualidade do produto é, portanto, altamente dependente da qualidade do insumo e, portanto, idealmente, a reciclagem mecânica requer materiais bem classificados e resíduos plásticos livres de contaminação, que muitas vezes são escassos.

Opções inovadoras de "início de vida" para minimizar impacto ambiental são igualmente importantes. Educar consumidores e empresas em direção ao "pensamento do ciclo de vida" incentivará uma visão holística sobre produtos de plástico além de seus impactos conscientes associados ao uso e descarte de plásticos.

O meio ambiente menos tangível, mas potencialmente mais prejudicial estão associados à colheita de matéria-prima, processamento de energias e transporte (CHARMAS, 2022; HIRONO-HARA, 2021).

Os princípios e tecnologias da economia circular, portanto, precisam ser adotados em todas as etapas ao longo do processo de plástico e cadeia de suprimentos para minimizar o impacto ambiental e resíduos plásticos. Medidas úteis para uma futura economia circular incluem a redução no consumo de plástico, o design de produtos que possam ser reutilizados e reciclados em seus mercados, fabricação de plástico e bioplástico combinado com o uso de energia renovável, aumento das taxas de cobrança, quando necessário, e métodos de reciclagem circular e '*upcycling*' (ISHWARYA, 2021).

Devido à competitividade de custo das práticas estabelecidas da indústria de plástico e modelos de negócios lineares, a implementação destas medidas requer não só progresso tecnológico, mas também investimento econômico e incentivos financeiros criados por legisladores (ISHWARYA, 2021; HU, 2021).

2.5 Aplicações industriais e o mercado de bioplástico

Atualmente, quase todos os monômeros necessários para a produção de polímeros de fonte renovável, isto é, substitutos químicos para polímeros de origem fósseis, podem ser obtidos da biomassa. A biomassa pode suprir a síntese de novos polímeros que não são derivados de recursos fósseis.

A produção anual de polímeros 100% de base biológica é de aproximadamente 2 milhões de toneladas (SODHI, 2022), sendo o plástico biodegradável responsável por dois terços desse valor (AL-AMRI, 2020). A produção mundial foi de aproximadamente 7,5 milhões de toneladas em 2018 e deve chegar a 9,1 milhões de toneladas em 2023, com capitalizações de mercado de US \$1,1 bilhão e US \$1,7 bilhão, respectivamente.

Por outro lado, o total da produção de plástico baseada em fósseis é atualmente > 380 milhões toneladas por ano (GRZELCZYK, 2021). A participação no mercado global de bioplásticos permanece baixo, mas vem apresentando um crescimento anual de 4%. A taxa de crescimento na Europa é de 10%, principalmente impulsionado pelas futuras regulamentações do mercado e pelo aumento da demanda do consumidor por produtos sustentáveis. O crescimento global poderia chegar a 20% se os bioplásticos fossem subsidiados e apoiados politicamente de forma semelhante aos biocombustíveis (MONTENEGRO, 2021).

O Aumento da demanda e regulamentações voltadas para a reciclagem podem criar incentivos para que a reciclagem aprimorada de PLA (ácido polilático) seja facilitada, como reciclagem química e melhores instalações de biodegradação, mas também abrir caminho para novos bioplásticos, como PHAs (polihidroxialcanoato), que são mais hidrolisáveis e, portanto, mais compatível com os insumos existentes (SODHI, 2022).

Embalagens de alimentos e bens de consumo de alta rotatividade são os maiores mercados para produtos de vida curta a média de plásticos e, portanto, também para bioplásticos. Empresas são confrontadas com o equilíbrio de propriedades materiais estabelecidas conhecidas pela empresa e pelos consumidores com diversos fatores relacionados com a sustentabilidade ao longo da cadeia de abastecimento de um novo material potencialmente mais sustentável.

O Fórum Econômico Mundial (WEF) destaca que o interesse dos investidores em ativos ambientais, sociais e de governança está crescendo, com 86% acreditando que estes serão os melhores investimentos de longo prazo.

Atualmente, US \$30 trilhões são gastos em ativos sustentáveis globalmente (um terço dos investimentos totais), com o plástico e a mudança climática no topo da lista de interesses de investidores sustentáveis (SODHI, 2022; BRUNEROVÁ, 2020). Várias grandes organizações e empresas fizeram compromissos para desenvolver e produzir plásticos mais sustentáveis, que devem aumentar a demanda futura de bioplástico.

A *Alliance to End Plastic Waste*, que compreende grandes empresas químicas, se comprometeu a investir US \$1,5 bilhão em projetos relacionados a plástico sustentável. Já a empresa Nestlé se comprometeu com cerca de US \$2 bilhões para desenvolver plásticos reciclados de qualidade e alimentar a tecnologia de produtos sustentáveis incluindo os 100% bioPET. A montadora Peugeot Citroën SA, por sua vez, compromete-se a produzir 20% de seus plásticos com base em fontes renováveis. Enquanto a empresa Toyota se comprometeu a comprar 25% da produção de bioplástico (bioPE) de origem vegetal brasileira (CRUZ, 2014; ANDRADE, 2020).

Investimento em tecnologias de bioplástico, no entanto, demonstra ser um negócio de alto risco, devido aos altos investimentos, embora escalas maiores possam reduzir custos e criar demandas e incentivos para infraestrutura de reciclagem.

Para alguns bioplásticos populares baseados em PLA (ácido polilático) e PHA (polihidroxialcanoato), no entanto, a demanda excede a oferta. Os incentivos regulatórios, incluindo a tributação de materiais que não sejam de base biológica, impulsionaram ainda mais a demanda por bioplásticos, como o polietileno furanoato (PEF).

Neste sentido, políticas orientadas para a circularidade são necessárias para incentivar as empresas a examinar todas as etapas ao longo do processo de suas linhas de produção e de seu ciclo de vida, além de conscientizar os consumidores a escolher produtos mais sustentáveis.

2.6 Borra de Café como fonte de compostos bioativos

As borras de café usadas recentemente têm sido extensivamente pesquisadas como material precursor para uma variedade de aplicações de valor agregado, incluindo biocombustíveis, catalisadores, cosméticos, compostos e ingredientes alimentícios. As borras de café usadas são ricas em uma diversidade de classes de compostos, como polissacarídeos, proteínas, fenólicos, lipídios e alcalóides, e como tal, são candidatos adequados para aplicações em áreas relacionadas com alimentos (FRANCA, A.S , 2022; OLIVEIRA, L.S, 2016).

Recentemente identificaram na borra de café (BC) compostos bioativos de qualidade alimentar (por exemplo, ácidos clorogênicos e seus derivados e cafeína) que podem ser utilizados em formulações de alimentos, ingredientes alimentares (por exemplo, fibra), e serem usados como precursores para materiais de embalagens de alimentos (por exemplo, filmes biopoliméricos e cargas compostas).

O reaproveitamento e a reciclagem de BC, visa evitar seu descarte em aterros sanitários, e não apenas minimizam os impactos ambientais na cadeia de produção e no consumo do café, mas também permitem um atendimento ampliado ao ciclo de vida do café. O aumento de sua reutilização traz vantagem ao estender o ciclo de vida do serviço de café se as próprias indústrias de café solúvel e insolúvel pudessem processar a BC, em produtos alimentícios com valor agregado, empregando os conceitos de biorrefinaria e economia circular (GETACHEW DAGNEW GEBREEYESSUS, 2022).

No entanto, com o desenvolvimento e o uso de tecnologias inovadoras (por exemplo, ultrassom, micro-ondas e outros) para extração, fracionamento e purificação de compostos de borras de café, um espectro mais amplo de aplicações podem ser previstas para produtos derivados de BC (BOUHZAM, I., 2023).

Análises futuras devem considerar a desintoxicação e posterior hidrólise dos compostos da BC, permitindo assim a aplicação de uma diversidade de processos biotecnológicos para a conversão de BC em insumos de qualidade alimentar, minimizando a necessidade de usar produtos agrícolas e alimentares reais para tais empreendimentos (FRANCA, A.S, 2022; OLIVEIRA, L.S, 2016).

3. Método

Trata-se de uma pesquisa aplicada, do tipo exploratória e experimental, que foi dividida em dois momentos.

Inicialmente, foi definida a parceria com algum estabelecimento que servia a bebida café, e conseqüentemente, produziria o resíduo da borra de café. Neste caso, a instituição de Ensino Superior, o Centro Universitário de Brasília (CEUB), colaborou gentilmente em fornecer os resíduos já que é servido para seus funcionários em alguns períodos do dia, a bebida do café. Dessa forma, foi feito contato com a área da copa (local de maior centro de distribuição do café dentro da universidade) para nos fornecer os resíduos do café ao longo desta pesquisa. Cabe ressaltar que os resíduos de café (borra de café) seriam descartados no lixo.

Em seguida, deu-se seqüência a realização da segunda etapa da pesquisa, no laboratório de biotecnologia do CEUB, onde foram utilizadas as borras de café previamente coletadas para a produção de alguns tipos de bioplásticos.

3.1 Estabelecimento de um procedimento padrão para a produção do biofilme

A partir da aquisição dos resíduos da borra de café, foram testadas diferentes estratégias, baseadas na literatura científica, e então estabelecidos protocolos para a produção do bioplástico.

Para isto, foram organizados o preparo de três principais protocolos experimentais conforme descrito na tabela a seguir (Tabela 1):

Tabela 1- Característica dos protocolos testados.

Protocolo	Composição	Tipo de fibra
Protocolo 1	Borra de café úmido, amido, glicerina, água destilada, HCL.	Nenhuma.
Protocolo 2	Borra de café úmido, amido de milho, glicerina, água destilada.	Fibra de celulose, proveniente do papel reciclável.
Protocolo 3	Borra de café úmido, amido de milho, glicerina,	Fibra de celulose (SCOBY)

	água destilada, gelatina, mudanças de concentrações e disposição dos ingredientes.	proveniente do biofilme cultivado pela bebida fermentada kombucha.
--	--	--

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Os protocolos foram adaptados de Thiré et al. (2003), e o efeito da variação da quantidade do plastificante glicerol a 1-5% (m/v) na produção de biofilme de amido puro também foi avaliado, bem como, a influência de duas temperaturas a 37°C e a 67°C para a secagem desses produtos.

Para a preparação dos biofilmes foram utilizados 5g de amido ou 5g de amido e microfibras de celulose, dissolvidos em 50mL de água destilada a 25°C, acrescido de glicerol 2%, e em seguida, foram homogeneizados com a adição 50mL de água destilada sob ebulição (98°C). O produto final foi fervido por 15 min sob constante agitação e resfriado a 37°C. Em seguida, o insumo obtido foi levado para a estufa em estufas e testado em diferentes temperaturas.

3.2 Avaliação dos parâmetros dos bioplásticos produzidos: resistência física, química e biológica

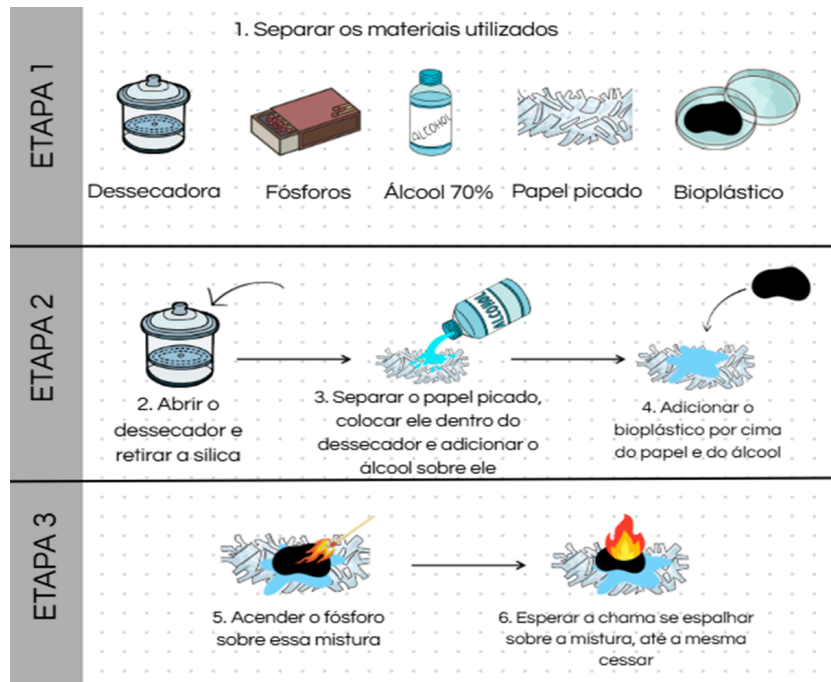
Após o estabelecimento dos protocolos de produção dos bioplásticos, testou-se os parâmetros de resistência destes bioplásticos. Para isso, foram realizados testes de resistência ao calor, teste de cisalhamento, teste de solubilidade e teste de decomposição.

3.2.1 Teste de Temperatura

O teste de resistência ao calor, consistiu em diferentes maneiras de avaliar como o bioplástico se comporta ao ser exposto ao calor. Para isso, pedaços dos bioplásticos produzidos foram separados e testados para verificar se os produtos eram resistentes ao calor, e se eram condutores de energia neste mesmo formato, além de serem expostos a altas temperaturas dentro de uma estufa.

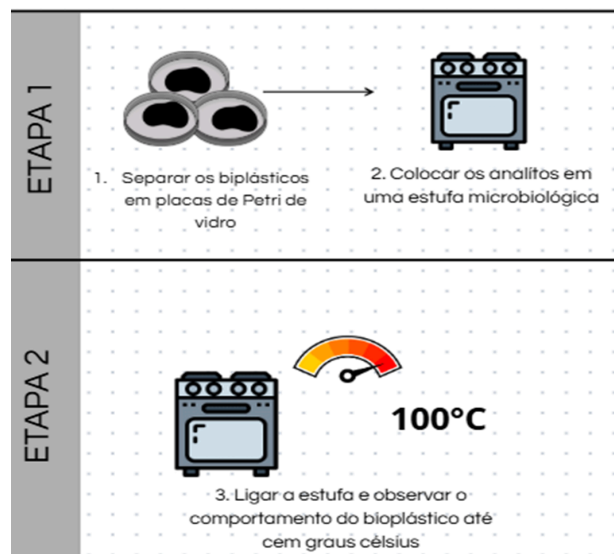
No primeiro momento (Figura 1), os bioplásticos foram testados com fogo direto, foi utilizado papel e álcool para a combustão, e no segundo momento (Figura 2) os bioplásticos foram colocados na estufa a 100°C.

Figura 1. Teste de resistência ao fogo direto.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 2. Teste de resistência dos bioplásticos na estufa a 100 °C.



Fonte: Autoria própria (2025).

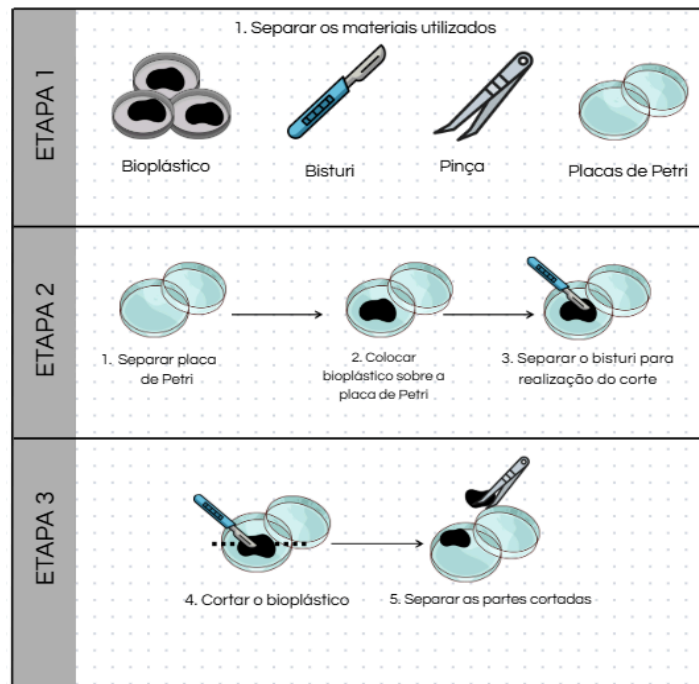
O primeiro momento, assim como apresentado no primeiro esquema consistia em adicionar à dessecadora aberta uma amostra de bioplástico, papel picado e etanol 70% sobre a mesma, em seguida acendemos um fósforo para observar o tempo de queima deste produto, bem como o aspecto de sua morfologia após a combustão.

No terceiro momento, os bioplásticos foram colocados em placas de petri de vidro e levados para a estufa em diferentes temperaturas, de 40 a 100°C, para observar possíveis alterações em sua morfologia quando submetidos a temperatura elevada.

3.2.2 Teste de Cisalhamento

O teste de cisalhamento foi realizado com o auxílio de um bisturi com lâmina de número 24.e. Este teste consistiu em separar os exemplares de bioplásticos e colocá-los sob uma placa de Petri. Em seguida, posicioná los em superfície lisa para tentar realizar o corte com o bisturi, e assim, observarmos como as diferentes composições podem interferir na resistência do biofilme (Figura 3).

Figura 3. Teste de cisalhamento.

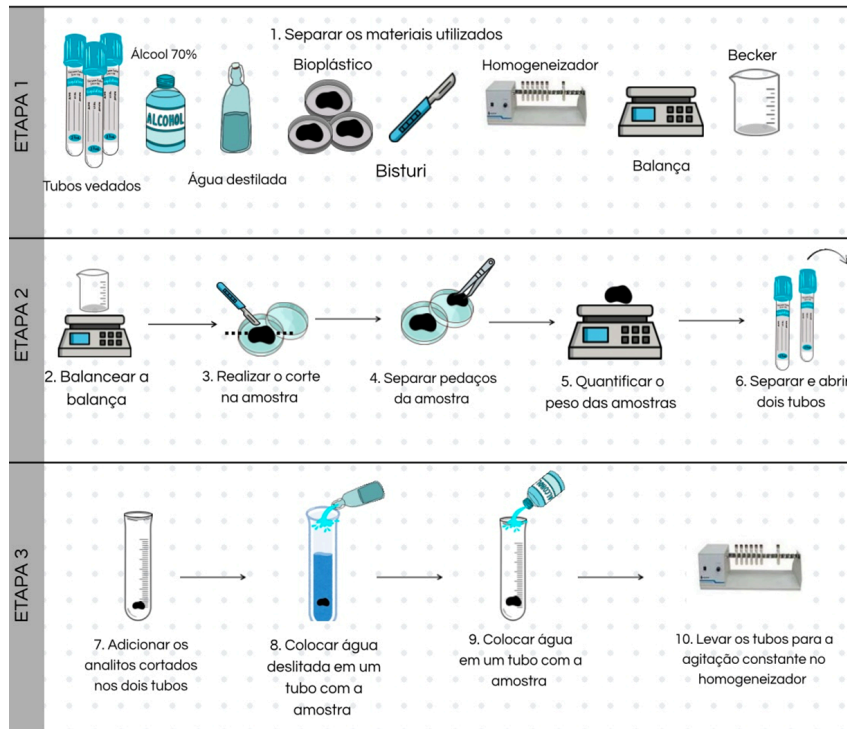


Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.3 Teste de Solubilidade

O teste de solubilidade foi realizado a fim de verificar se o bioplástico produzido é solúvel em alguns solventes. Para isso, foram utilizados a água destilada e o álcool e então, foram separados em diferentes recipientes, tubos de plástico cônicos e 0,25 g de bioplástico. Foram utilizados 13 mL de cada solvente separadamente, sob agitação em um período de 24h (Figura 4).

Figura 4. Teste de solubilidade em água e no etanol 70%.

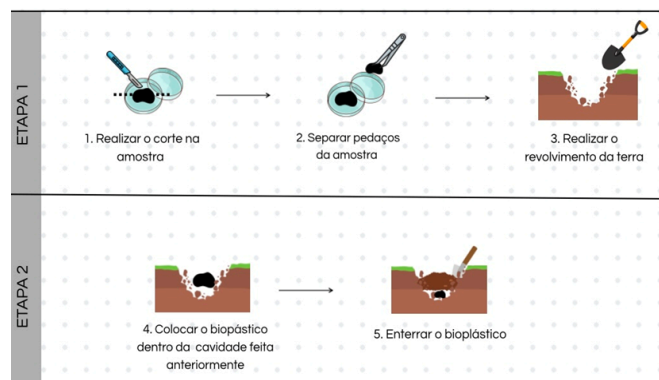


Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.4 Teste de Decomposição

O teste de decomposição foi feito para avaliar se os biofilmes produzidos podem se decompor, e em quanto tempo. Para isso, as amostras foram enterradas em um jardim controlado e frequentemente regado, e então seu processo foi acompanhado durante quatro meses até ele se desfazer completamente do meio inserido (Figura 5).

Figura 5. Teste de decomposição.



Fonte: Autoria própria (2025).

4. Resultados e discussões

4.1 Bioplásticos produzidos

A pesquisa buscou a produção de um insumo de origem sustentável que possa servir como base para a aplicação industrial, de forma sustentável e economicamente viável.

Sendo assim, os resultados esperados foram satisfatórios para o estabelecimento de protocolos destinados à produção de bioplástico, a partir da borra do café como a base do insumo, atingindo diferentes aspectos morfológicos e de texturas.

Entretanto, ao longo do processo de desenvolvimento destes bioplásticos alguns produtos apresentaram aspectos limitados, como por exemplo, dificuldade para secar/desidratar, textura muito oleosa e até mesmo aerada ou esfarelada, como mostra a figura 6. Este protocolo se refere ao Protocolo 1 descrito na metodologia, onde não houve a adição de fibras.

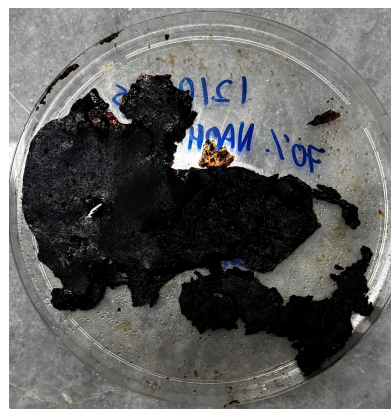
Figura 6. Características estruturais de alguns produtos produzidos no início do seu desenvolvimento. (A) bioplástico com aspecto oleoso; (B) bioplástico com aspecto ainda oleoso, porém desintegrado e demasiadamente mole.

A



(Fonte: Autora, 2024)

B



(Fonte: Autora, 2024)

Uma hipótese levantada para esse resultado foi a incorporação do HCL, pois em comparação com os outros dois protocolos que não utilizaram deste elemento, tiveram um resultado um tanto quanto diferente do apresentado. Além da ausência de fibra em sua composição.

Já no Protocolo 2, descrito na tabela 1, obtivemos um resultado melhor em relação a consistência do produto e a sua secagem, cabe ressaltar que foi incorporado a fibra de celulose provenientes de papel reciclável, que por sua vez apresenta fibras de celulose (Figura 7).

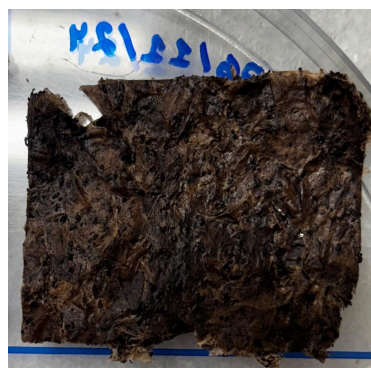
Figura 7. Produto de bioplástico com a adição de papel reciclável.

A



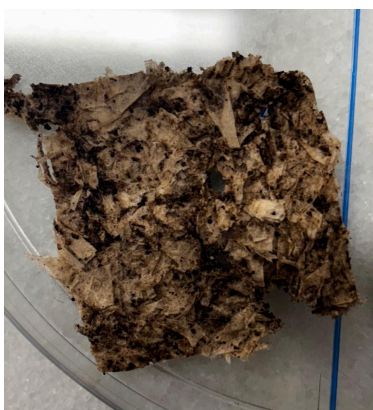
(Fonte: Autora, 2024)

B



(Fonte: Autora, 2024)

C



(Fonte: Autora, 2024)

D



(Fonte: Autora, 2024)

Já no Protocolo 3, descrito na metodologia, obtivemos o melhor resultado, pois houve a retirada do HCL, e incorporado a gelatina e a fibra de celulose proveniente da fermentação da kombucha (Figura 8).

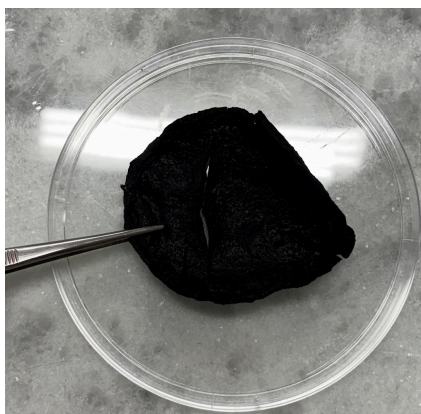
Figura 8. Produção do bioplástico a partir da celulose produzida pela fermentação da kombucha.



(Fonte: Autora, 2025)

Os resultados em si, variaram em termos de concentrações e composição química, pois existe diferenças na composição de cada amostra testada, por exemplo, o insumo denominado A1 (Protocolo 3), possui em sua composição borra de café, amido, glicerina e a água destilada, esta amostra tem um tempo de preparação maior, cerca de 72h, por conta da falta de fibra e gelatina, além de apresentar uma textura mais maleável em relação às outras, como mostra a figura 9.

Figura 9. Produção do bioplástico A1 (Protocolo 3). (Fonte: Autora, 2025)



Na segunda amostra (Protocolo 3), identificada como A2, possuía em sua composição amido, borra de café, glicerina, gelatina e água destilada. Esta amostra apresenta uma morfologia maleável, porém bem estruturada, dessa forma, foi observado que a gelatina se integra na composição do bioplástico, deixando as amostras mais consistentes, e com menor tempo de preparação e secagem (Figura 10).

Figura 10. Produção do bioplástico A2 (Protocolo 3).



(Fonte: Autora, 2025)

A terceira amostra, identificada como A3 (Protocolo 3), possui em sua composição amido, borra de café, glicerina, fibra de celulose proveniente da fermentação da kombucha, gelatina e água destilada. A partir desta amostra, já é perceptível que a presença da fibra de celulose influencia na morfologia do bioplástico, pois a amostra já não é maleável, o tempo de secagem é mais rápido, cerca de 8h, quando comparado com as duas primeiras. Neste caso, também houve dificuldade de realizar o corte (Figura 11).

Figura 11. Produção do bioplástico A3 (Protocolo 3). (Fonte: Autora, 2025)



Dessa forma, a partir desses aspectos analisados, o terceiro protocolo foi o que obteve resultados mais satisfatórios, quando espera-se uma textura de bioplástico mais resistente, em contrapartida, se a textura almejada é um bioplástico mais maleável os outros protocolos podem ser uma alternativa satisfatória.

De acordo com a literatura, a produção de bioplástico utilizando a borra do café é ampla, e geralmente utilizam, amido, fécula, gelatina e diferentes tipos de fibras no BC.

Segundo Leite e Pinto (2019), para a produção do bioplástico utilizaram a proporção de 1:1 (16% de gelatina e 16% de glicerol), apresentando melhor desempenho em relação a outros tipos de bioplástico. Essa proporção muitas vezes se repetem, porém outras utilizam apenas a gelatina em sua composição, apresentando assim, maior flexibilidade (ZHAO, X.; ZHOU L., 2017). Além disso, foi observado que ligações físicas cruzadas que ocorrem devido às interações intermoleculares durante o resfriamento auxiliam no estabelecimento da rede do gel (JOLY-DUHAMEL C., 2002), também foi demonstrado por Lajarim (2014) que o uso da gelatina influencia no comportamento dos géis, fortalecendo a rede dos mesmos.

No entanto, filmes biopoliméricos obtidos exclusivamente a partir de proteínas, apresentam geralmente baixa elasticidade e são quebradiços, além disso, a introdução de plastificantes é uma alternativa para conferir uma maior elasticidade ao sistema (LEITE, I.S.; SILVA, L.A.; PINTO JR, W.R.,2019). Dessa forma, a questão do comportamento da gelatina e das proteínas puras foi testado em algumas pesquisas. Nesta pesquisa, ao utilizarmos a fibra de celulose proveniente do papel reciclável, no primeiro protocolo, seu resultado se mostrou satisfatório pela formação de um insumo maleável, porém com aspectos quebradiços, mesmo com o uso de glicerina.

Para que o biofilme tenha um bom desempenho, os plastificantes devem ser compatíveis com o biopolímero, um exemplo seria o uso do glicerol que, devido a estrutura e seu caráter hidrofílico, interagem com a interface do polímero, enfraquecendo as forças intermoleculares, ocasionando maior mobilidade às cadeias formadoras da matriz polimérica e conseqüentemente, aumentando a flexibilidade dos filmes (MARCILLA, 2009; SCHORROYEN, 2001).

Além disso, grande parte da literatura sobre bioplásticos utilizaram algum tipo de fibra tiveram resultados satisfatórios e muito parecidos com o que foi alcançado no decorrer dessa pesquisa, respeitando o tratamento de cada fibra, por exemplo no artigo “Alternativa a fabricação do plástico convencional: produção de biopolímeros a partir da *solanum tuberosum*”, foi utilizada a fibra do coco, em “Obtenção e Avaliação de Materiais Biodegradáveis a Partir de Blendas de Amido da Semente da Jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam) e Celulose de Fibra de Sisal (*Agave sisalana* Perrine)”, a obtenção de amido de semente de jaca, glicerol e celulose de fibra de sisal, visando a caracterização e avaliação à preparação de filmes finos para embalagens, onde obtiveram os resultados esperados.

Na pesquisa de Paulino (2019), a produção de bioplásticos a partir de resíduos de café foi usado como matriz de liberação de antimicrobianos, produzindo a fabricação de um bioplástico a partir da borra de café e amido de 5 g. também testaram variações com glicerol 1-4% (m/v) e duas temperaturas de secagem 37°C e 67°C nos biofilmes de amido puro. O protocolo estabelecido nesta pesquisa é bem semelhante a pesquisa realizada, no entanto, nas amostras produzidas anteriormente, os bioplásticos eram colocados numa estufa a temperatura 50°C e, em comparação com o artigo citado do protocolo 100% amido, já o terceiro protocolo realizado por esta pesquisa, obteve uma variação maior na quantidade de matérias, como o de café, do amido, da glicerina, assim como a incorporação de novos componentes.

4.2 Avaliação da estrutura física dos bioplástico produzidos:

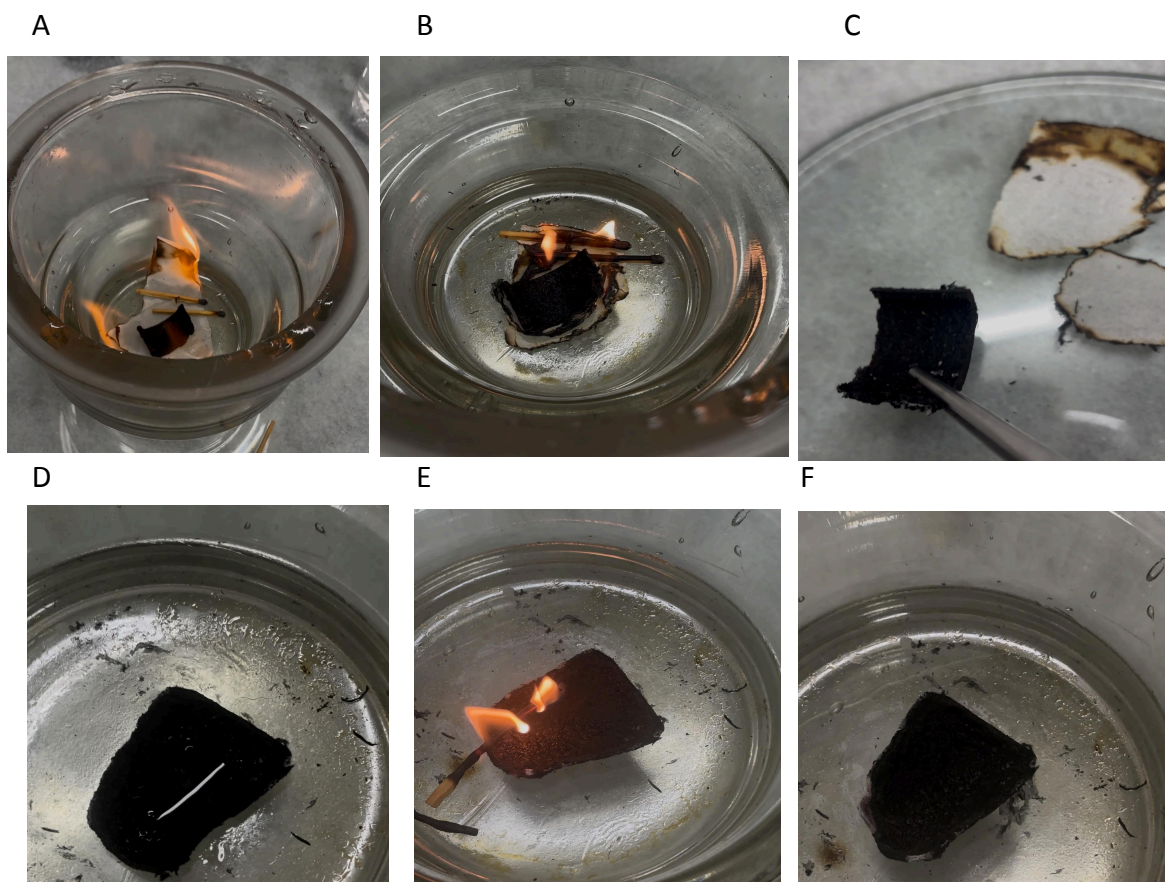
Os testes de resistência à temperatura foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento térmico dos bioplásticos desenvolvidos no projeto, em comparação com referências da literatura sobre plásticos convencionais derivados de petróleo. O procedimento adotado foi adaptado para atender às condições e recursos disponíveis, tanto em termos financeiros quanto em relação à disponibilidade de equipamentos na instituição.

As amostras foram submetidas a aquecimento progressivo pela chama direta, sendo avaliadas visualmente e mecanicamente em cada etapa, registrando alterações de cor, deformações, fissuras e amolecimento sob altas temperaturas. O material não

desintegrou e adquiriu aspecto de carvão quando submetido a chama diretamente. Também se verificou baixa formação de fuligem durante a queima e rápida absorção e dissipação de calor. O tempo de dissipação, foi inferior a 10 minutos para a maioria das amostras. Algumas amostras mais maleáveis apresentaram dissipação mais lenta, mas ainda assim inferior a esse tempo (Figura 12).

O bioplástico se manteve nas mesmas condições quando submetido a temperatura de 100 graus celsius na estufa durante o período de 30 minutos. Comparando com outros plásticos presentes em embalagens de alimentos, tendo sua principal matéria prima o polietileno tereftalato (PET), se submetidas a temperaturas constantes de 150 graus pelo tempo de 30 minutos, apresentam uma degradação considerável em sua morfologia (FREIRE, 1997.)

Figura 12. Amostras foram submetidas a aquecimento por chama direta. As imagens de A a F representam a sequência do aquecimento com chama direta.



Fonte: Autora, (2025).

A estabilidade térmica foi comparada com amostras de PET e PE de origem petroquímica, utilizando dados do banco MatWeb (Material Property Data) referentes à Temperatura de Deflexão sob Carga (DTUL ou HDT), ou seja quando o material começa a se deformar sob carga e calor.

Importante lembrar que o teste de HDT é útil para estimar a temperatura de serviço relativa de um polímero quando submetido a carga mecânica, mas trata-se de um ensaio de curto prazo que não deve ser utilizado isoladamente no projeto de produtos, já que fatores como tempo de exposição, taxa de aquecimento e geometria da peça influenciam o desempenho térmico.(MATWEB, 2025)

A maioria dos plásticos , como polipropileno, esse de origem animal, são versáteis e com baixo preço , porém dependendo muito do petróleo. Esse atributo, embora vantajoso para aplicações econômicas, contribui para seu acúmulo no meio ambiente e riscos à saúde humana, especialmente considerando que métodos convencionais de descarte, como aterros e incineração, agravam o impacto ambiental, uma vez que esse material não apresenta biodegradabilidade, podendo permanecer no ambiente por séculos, causando impactos significativos.(FONTUNA; A .L , 2020)

A literatura mostra que os plásticos derivados de petróleo apresentam alta estabilidade térmica, permanecendo funcionais em temperaturas elevadas antes de sofrer degradação, enquanto bioplásticos como o ácido polilático (PLA) e os poli-hidroxicanoatos (PHA) possuem menor resistência térmica. Estudos publicados na revista *Sustainability* (MDPI) indicam que o PLA apresenta temperatura de transição vítrea entre 55–65°C e ponto de fusão de 145–180°C, sendo que acima de (~60°C) tende a perder rigidez e deformar-se.(CHEN X.,2022; GALVEZ L. ,2020; PEELMAN N., 2015) No presente estudo, mesmo com metodologia adaptada, observou-se que as amostras de bioplástico deformaram-se e perderam a integridade mecânica quando submetidas às temperaturas mais altas, como a de 100°C, provavelmente mais altas que PET e PE. Portanto, deve-se haver mais estudos relacionados à calorimetria das amostras para melhor comprovação dos resultados, visto que ambientalmente já são mais favoráveis.

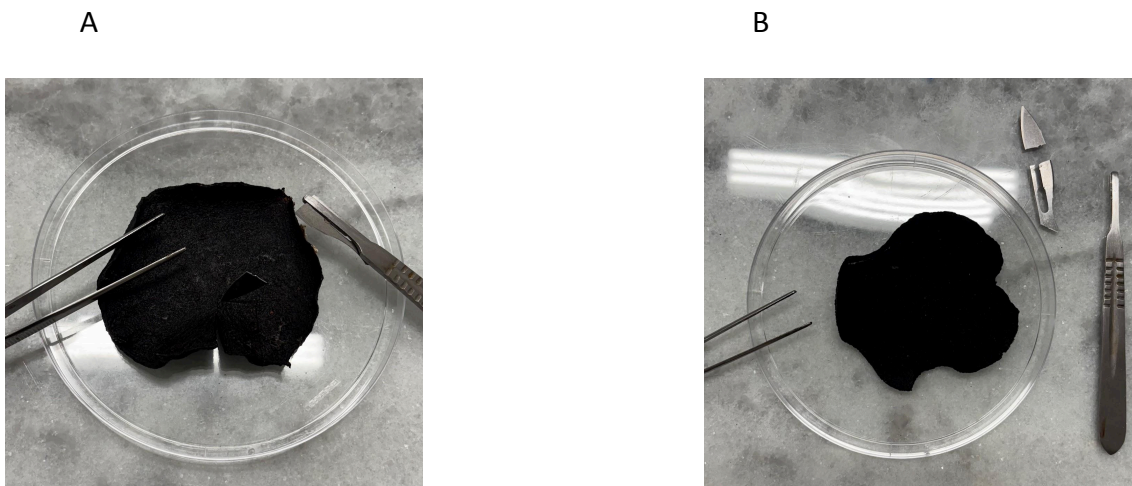
A literatura também mostra que a produção de bioplásticos demanda menos energia e é menos suscetível às oscilações no preço do petróleo, ao contrário dos plásticos convencionais, que consomem aproximadamente 4% do petróleo mundial em sua fabricação (COPPOLA, 2021). Isso os torna mais estáveis em termos de custo e menos dependentes de combustíveis fósseis.

Diante do exposto, é importante ressaltar que a temperatura das chamas não possuem uma temperatura exata, portanto não foi possível ser medida, porém é perceptível que o insumo produzido neste trabalho consegue se modificar quando submetido a altas temperaturas. Outros pontos observados, são que foram percebidas pequenas quantidades de fuligem e um grande potencial de absorção do calor.

Além disso, cabe ressaltar que os testes de temperatura não seguiram os padrões encontrados na literatura, porém para um ensaio inicial foi possível observar que somente em temperaturas muito elevadas, como a de 100°C houve alteração na estrutura dos bioplásticos produzidos. Há necessidade de se realizar novos ensaios, com a padronização descrita na literatura para plástico de origem fóssil.

Já o teste de cisalhamento, foi realizado como um tipo de teste de resistência física, logo foi um teste adaptado às condições disponíveis. Sendo assim, as amostras de bioplástico obtidas no protocolo 1 e 2 foram cortadas com certa facilidade, uma vez que não há a presença de gelatina e fibra no primeiro insumo. Por outro lado, havia gelatina e fibra de papel no protocolo 2. Já nas amostras do protocolo 3, não foi possível a realização do corte, houve muita resistência, ao ponto de quebrar a lâmina do bisturi. Lembrando que a havia celulose extraída da fermentação da kombucha, gelatina e diminuição do plastificante, glicerina (Figura 13).

Figura 13. Teste de cisalhamento. A e B demonstrando a tentativa de corte no bioplástico e a quebra do bisturi devido a resistência deste material produzido.



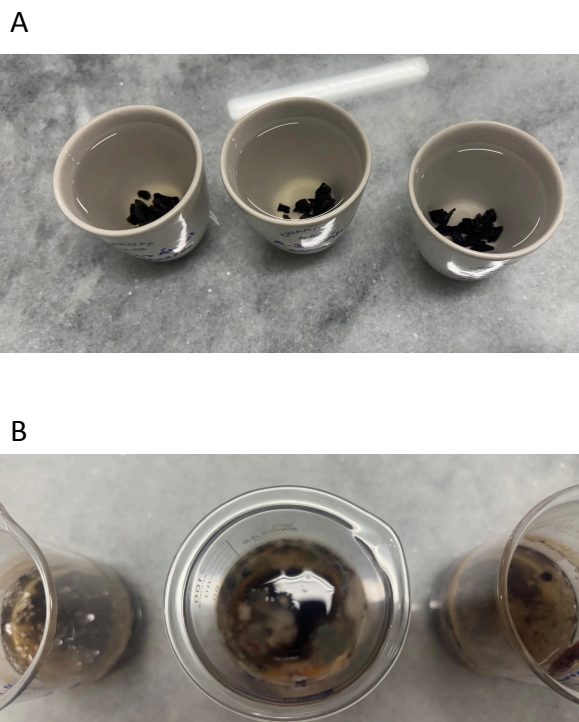
Fonte: Autora, (2025)

Fonte: Autora, (2025)

De acordo com a literatura, foi encontrado um teste similar a esse chamado de teste de perfuração, onde a força e a deformação na ruptura foram determinadas em, de acordo com essa metodologia, os biofilmes foram fixados em diâmetros específicos e perfurados por uma sonda, porém a dimensão real para calcular a força e dureza dos materiais foi separada em equações e somadas juntamente com a velocidade de perfuração da sonda (GONTARD, 1992; SOBRAL, 1999). Dessa forma, o teste de cisalhamento realizado se baseou na presença do corte ou não do insumo produzido.

Com relação a solubilidade em água dos bioplásticos foi determinada segundo o método proposto por Gontard et al. (1992) porém foi adaptado de acordo com as condições disponíveis. Sendo assim, todos os bioplásticos se mostraram resistentes à água por oito dias, já em etanol apresentaram sinais de solubilidade em quatro dias (Figura 14).

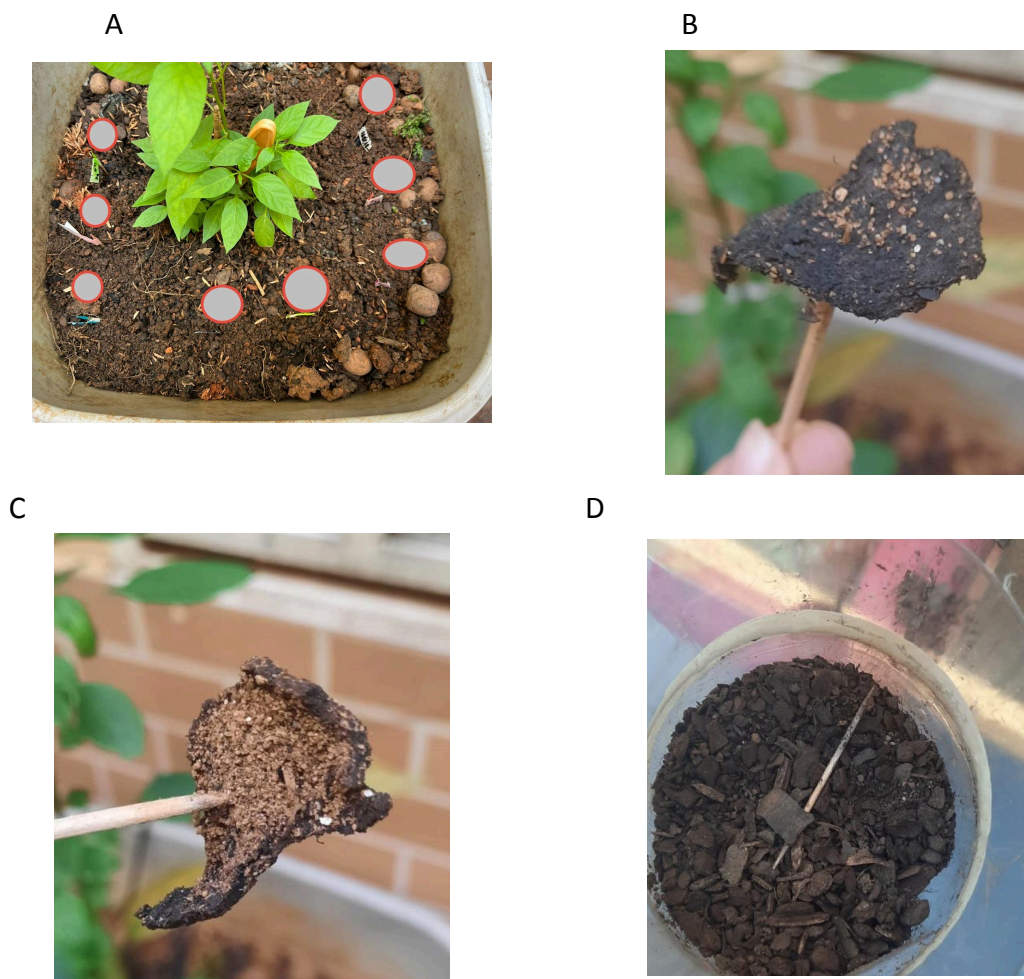
Figura 14. Teste de solubilidade em água. (A) início do processo. (B) após oito dias submerso em água.



Fonte: Autora, (2025)

As análises de decomposição das amostras de bioplástico foram enterradas superficialmente em um jardim e identificadas com palitos de dente coloridos posicionados acima de cada unidade. Após quatro meses, observou-se que a maioria dos exemplares enterrados desapareceram, porém dois destes exemplares reduziram o tamanho e começaram a apresentar a presença de fungos, o que pode significar que a composição dos insumos pode ter interferência na decomposição (Figura 15).

Figura 15. Processo de decomposição das amostras de bioplástico.



Fonte: Autora, (2025)

O processo de biodegradação de biofilmes é complexo, dependendo diretamente da estrutura do polímero, das condições ambientais (temperatura, umidade, radiação e disponibilidade de nutrientes) e do tipo de microrganismos presentes no solo (OLIVEIRA, 2007). A introdução no solo de compostos contendo carbono, nitrogênio ou fósforo pode servir como fonte de nutrientes para os microrganismos, promovendo a degradação por catabolismo ou por co-metabolismo (MONTEIRO, 2001).

Na análise de biodegradabilidade, CHANDRA (1998), apresentou perda total de massa em apenas 30 dias de enterramento. Essa rápida decomposição está possivelmente associada à presença de gelatina em sua composição, já que se trata de um polímero proteico de origem animal e biodegradável. No entanto, quando

misturada a outros componentes, como no presente estudo, o tempo de decomposição aumentou para cerca de três meses. Esse comportamento pode estar relacionado ao uso de amido de batata e fibras de coco, utilizados neste estudo e, ricos em glicose e compostos orgânicos que auxiliam na nutrição do solo, bem como à presença de glicerina, que possui base orgânica e baixa toxicidade. Além disso, ele considerou que a ausência de reagentes químicos como HCl, utilizados em outras formulações, pode ter influenciado a taxa de degradação mais rápido, porém ainda com resultados satisfatórios, visto que não haveria materiais danosos para o meio ambiente, já que a glicerina, por sua vez, é de base orgânica e não apresenta danos.

Outros resultados obtidos com biofilmes à base de gelatina corroboram com os apresentados por LUCENA (2015), que avaliaram biofilmes produzidos com xilana e gelatina e verificaram alta degradabilidade em prazos curtos.

O teste de decomposição, com o enterramento no solo é amplamente utilizado para avaliar a degradação, mas apresenta limitações de reprodutibilidade, devido à falta de controle das condições climáticas e da microbiota presente no local (LEITE; SILVA; PINTO JR., 2019). Em termos práticos, quando a degradação leva muitos anos nessas condições, o polímero não é considerado biodegradável.

Os resultados obtidos com biofilmes à base de gelatina corroboram com os apresentados por LUCENA (2015), que avaliou biofilmes produzidos com xilana e gelatina e verificaram alta degradabilidade em prazos curtos. Diferentemente dos bioplásticos, os polímeros convencionais liberam substâncias tóxicas como dioxinas, bisfenol A (BPA) e ftalatos, além de microplásticos e gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (CO₂), responsável por cerca de 75% do aquecimento global e com permanência na atmosfera superior a um século.

Estudos como o de DA SILVA CASTRO (2020) e SILVA (2023) demonstram que fibras (como coco ou sisal) aumentam a resistência, reduzem a solubilidade em água e podem promover maior cristalinidade, o que também foi observado visualmente neste trabalho, apesar de não ter sido quantificado por técnicas como DRX.

A adição de fibra de celulose, tanto neste estudo quanto em pesquisas anteriores, reduziu a maleabilidade e aumentou a rigidez dos biofilmes. O comportamento quebradiço observado em algumas amostras, mesmo com plastificantes, é consistente com a literatura.

5. Conclusões

Durante o desenvolvimento desse projeto e a partir dos dados obtidos, o objetivo principal de conseguir criar um produto biotecnológico sustentável que possa ser utilizado como alternativa aos plásticos de origem de petróleo, foi alcançada, pois obtivemos sucesso na produção do bioplástico a partir da borra de café com diferentes aspectos, texturas e características de resistências a variáveis externas, como a temperatura, a solubilidade e a decomposição e o cisalhamento. Portanto, o resultado da pesquisa foi atingido e obteve como principal contribuição um insumo com aspectos sustentáveis, por meio da bioprospecção, e com capacidade e qualidade de se tornar um um potencial bioplástico para as indústrias, e influenciando diferentes áreas, como a ambiental, a saúde, a sustentabilidade e a economia verde. A pesquisa está alinhada aos princípios de economia verde, para que se gere impacto biotecnológico na qualidade de vida humana e animal, e do planeta como um todo.

Referências

A eco-eficiência: criar mais valor com menos impacto. Lisboa: WBCSD, 2001. Acordo de Paris, de 12 de dezembro de 2015.

Alamri, O., Albeltagy, R., Akabawy, A., Mahgoub, S., Abdel-Mohsen, D., Moneim, A., & Amin, H. (2020). Investigação das atividades antioxidantes e anti-inflamatórias, bem como do potencial de proteção renal do extrato de café verde em ratos albinos machos com diabetes induzido por dieta rica em gordura/estrepotocina. *Journal of Functional Foods*, 71, 103996.

Andrade, T.S. et al. Biochar obtained by carbonization of spent coffee grounds and its application in the construction of an energy storage device. *Chem. Eng.* 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15448-1: embalagens, 2008

Badr, A.N. et al. Spent coffee grounds valorization as bioactive phenolic source acquired antifungal, anti-mycotoxigenic, and anti-cytotoxic activities. *Toxins*. 2022.

BARBIERI, José Carlos. Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos. 2 ed São Paulo: Saraiva, 2007. ECO-INNOVATION OBSERVATORY.

BASTIOLI, Catia. Handbook of biodegradable polymers. United Kingdom: Rapra Technology, 2005.

Block, I. et al. Carbon adsorbents from spent coffee for removal of methylene blue and methyl orange from water. 2021.

Bouhzam, I.; Cantero, R.; Balcells, M.; Margallo, M.; Aldaco, R.; Bala, A.; Fullana-i-Palmer, P.; Puig, R. Comparação ambiental e de rendimento de métodos de extração rápida de cafeína e ácido clorogênico de borra de café. *Foods* **2023**, 12, 779.

BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, Campina Grande, v. 6, n. 2, p.127-139, 2011.

Brunerová, A. et al. Valorization of bio-briquette fuel by using spent coffee ground as an external additive. 2020.

BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT PORTUGAL (BCSD) 2013.

CANEVAROLO Jr, S.V. Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 3ª edição. São Paulo: Artliber Editora, 2010.

Chandra, P. K.; Sobral, P. J. A. Cálculo de propriedades viscoelásticas de biofilmes: aplicação de três modelos. *Ciências Tecnologia e Alimentos*. maio/ago. v. 20, n. 2, p. 250-256, 1998.

Charmas, B. et al. Smart preparation of microporous carbons from spent coffee grounds. Comprehensive characterization and application in explosives removal from water samples. *Colloids Surf. A Physicochem*. 2022.

Chen, X.; Chen, F.; Wang, G.; Ma, X.; Wang, J.; Deng, J. Louças de fibra de bambu descartáveis e ecológicas: propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas e comportamento de fluência. *Ind. Crops Prod*. **2022**, *187*, 115305.

Chen, X.-E.; Mangindaan, D.; Chien, H.-W. Green sustainable photothermal materials by spent coffee grounds. *J. Taiwan Inst*. 2022.

COPPOLA, F. Bioplastics: A sustainable alternative to petrochemical plastics. 2021.

Costabile, A.; Sarnsamak, K.; Hauge-Evans, A.C. Coffee, type 2 diabetes and pancreatic islet function—A mini-review. *Funct*. 2018.

Cruz, R. et al. Antioxidant activity and bioactive compounds of lettuce improved by espresso coffee residues. *Food Chem*. 2014.

Cruz, R. et al. Improvement of vegetables elemental quality by espresso coffee residues. *Food Chem*. 2014.

DA SILVA CASTRO, Fabiana. Obtenção e Avaliação de Materiais Biodegradáveis a Partir de Blendas de Amido da Semente da Jaca (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) e Celulose de Fibra de Sisal (*Agave sisalana* Perrine). 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado da Bahia (Brazil).

Da SILVA, M.F. et al. Design and evaluation of non-conventional extraction for bioactive compounds recovery from spent coffee (*Coffea arabica* L.) grounds. *Chem. Eng*. 2022.

DOS SANTOS PAULINO, Graziela et al. PRODUÇÃO DE BIOPLÁSTICO A PARTIR DE RESÍDUOS DE CAFÉ E SEU USO COMO MATRIZ DE LIBERAÇÃO DE ANTIMICROBIANOS1.(2019)

Ecoinnovation in industry: Enabling green growth. Paris: OCDE, 2009. cap 1. p. 21-57.

ECOSIGMA (Campinas).Relatório do projeto especial sobre sustentabilidade de três tipos de embalagens distribuídas no varejo.Campinas: ADVB, 2011.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. The New Plastics Economy – Catalysing action. Reino Unido: Ellen MacArthur Foundation, 2017.

Fortuna, A. L. L. Impactos ambientais dos plásticos: biopolímeros como alternativa para a redução do acúmulo de embalagens flexíveis de polipropileno no meio ambiente.,2020.

Franca, AS; Oliveira, LS: Potenciais Usos da Borra de Café Usada na Indústria Alimentícia. *Foods* **2022** , *11* , 2064.

Freire, Maria Teresa de Alvarenga Avaliação da estabilidade térmica de embalagens de polietileno tereftalato (PET): estudo dos oligômeros e substâncias voláteis / Maria Teresa de Alvarenga Freire-- Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Gálvez, J.; Correa Aguirre, JP; Hidalgo Salazar, MA; Vera Mondragón, B.; Wagner, E.; Caicedo, C. Efeito da velocidade da rosca de extrusão e das proporções de plastificante nas propriedades reológicas, térmicas, mecânicas, morfológicas e superficiais do PLA. *Polymers* **2020** , *12* , 2111.

Gazonato, E.C. et al. Thermomechanical Properties of Corn Starch Based Film Reinforced with Coffee Ground Waste as Renewable Resource. *Mater.* 2019.

GETACHEW DAGNEW GEBREEYESSUS, et al. *Towards the sustainable and circular bioeconomy: Insights on spent coffee grounds valorization. Science of the Total Environment*, v. 833, art. 155113, 2022.

GONTARD, N.; GUILBERT, S.; CUQ, J.L. Edible wheat gluten films: influence of the main process variables on film properties using response surface methodology. *J. Food Sci.*, v.57, n.1, p.190-199, 1992

GONTARD, N.; GUILBERT, S.; CUQ, J.L. Edible wheat gluten films: influence of the main process variables on film properties using response surface methodology. *J. Food Sci.*, v.57, n.1, p.190-199, 1992

Grzelczyk, J. et al. Evaluation of the inhibition of monoamine oxidase A by bioactive coffee compounds protecting serotonin degradation. *Food Chem.* 2021.

Guo, Z. et al. Fabrication of carbonized spent coffee grounds/graphene nanoplates/cyanate ester composites for superior and highly absorbed electromagnetic interference shielding performance. *Technol.* 2022.

Hirono-Hara, Y. et al. Glutathione fermentation by *Millerozyma farinosa* using spent coffee grounds extract and seawater. *Bioresour. Technol.* 2021.

Hsieh, T.-H. et al. Meso-pore dominant activated carbon from spent coffee grounds for high-performance electrochemical capacitors in organic electrolyte. *J. Environ. Chem. Eng.* 2021.

Hu, X. et al. Novel bio-based composite phase change materials with reduced graphene oxide-unctionalized spent coffee grounds for efficient solar-to-thermal energy storage. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2021.

Ishwarya, S.P.; Nisha, P. Foaming agents from spent coffee grounds: A mechanistic understanding of the modes of foaming and the role of coffee oil as antifoam. *Food Hydrocoll.* 2021.

Joly-duhamel, C ; Hellio, Dominique.; Ajdari A.; Djabouro, M. All Gelatin Networks: The Master Curve for Elasticity. Laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes, UMR ESPCI-CNRS 7636, and Laboratoire de Physico-Chimie Théorique, UMR ESPCI-CNRS 7083, 10, Rue Vauquelin, 75231 Paris Cedex 5, France. DOI:10.1021/la020190m. 2002

Kamil, M. et al. Environmental impacts of biodiesel production from waste spent coffee grounds and its implementation in a compression ignition engine. *Sci. Total Environ.* 2019.

Kim, M.-S.; Kim, J.-G. Adsorption characteristics of spent coffee grounds as an alternative adsorbent for cadmium in solution. *Environments.* 2020.

Lachheb, A. et al. Thermal insulation improvement in construction materials by adding spent coffee grounds: An experimental and simulation study. *J. Clean.* 2019.

Lajarim, C. N. Efeito da adição de gelatina nas propriedades termodinâmicas e nas características de géis e películas biodegradáveis obtidos a partir de amido de mandioca. Curso Superior de Engenharia de Alimentos do Departamento Acadêmico de Alimentos, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Campo Mourão, 2014.

Lee, K.-T. et al. Spent coffee grounds biochar from torrefaction as a potential adsorbent for spilled diesel oil recovery and as an alternative fuel. *Energy.* 2022.

LEITE, I.S.; SILVA, L.A.; PINTO JR, W.R. Biofilme de gelatina e glicerol com propriedade antibacteriana. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 6, n. 2, p. 1 – 11, 2019

Li, S. et al. From brown to colored: Polylactic acid composite with micro/nano-structured white spent coffee grounds for three-dimensional printing. *Int. J. Biol. Macromol.* 2021.

Lucena, C. A. A., Costa, S. C., Eleamen, G. R. A., Mendonça, E. A. M., Oliveira, E. E. Desenvolvimento de biofilmes à base de xilana e xilana/gelatina para produção de embalagens biodegradáveis. *Revista Polímeros*, 2015.

Lucena, C. A. A., Costa, S. C., Eleamen, G. R. A., Mendonça, E. A. M., Oliveira, E. E. Desenvolvimento de biofilmes à base de xilana e xilana/gelatina para produção de embalagens biodegradáveis. *Revista Polímeros*, 2015.

MAGRINI, Alessandra et al. Impactos ambientais causados pelos plásticos: Uma discussão abrangente sobre os mitos e os dados científicos. Rio de Janeiro: E-papers, 2012.

MARCILLA, A. *Plasticizers in the European Union*. Madrid: Plastics Additives and Compounding, 2009.

Mascarenhas, J. M. G. A. (2020). BIOPLÁSTICOS E PLÁSTICOS BIODEGRADÁVEIS SURFANDO A SEXTA ONDA: UM ESTUDO SOBRE A ECOEFICIÊNCIA. *Revista Valore*, 4, 133–142.

MATWEB. *Material Property Data*. 2025

Mohanty, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T.; Selke, S. E.; Harte, B. R.; Hinrichsen, G. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites: An Introduction. In: Mohanty, A. K.; Misra, M.; Drzal, L. T. Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005

Monteiro, R. T. R biodegradação de pesticidas em solos brasileiros. In: Melo I. S. De; Silva, C. M. M. S.; Spessoto, a. Biodegradação. Jaguariuna, p. 1 14. 2001.

Montenegro, J. et al. Bioactive compounds, antioxidant activity and antiproliferative effects in prostate cancer cells of green and roasted coffee extracts obtained by microwave-assisted extraction (MAE). *Food Res*. 2021.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. *Covid-19: Guterres diz que crise sanitária é oportunidade de reconstrução*. ONU News, 1 jun. 2020.

Nguyen, V.-T. et al. Adsorption of norfloxacin from aqueous solution on biochar derived from spent coffee ground: Master variables and response surface method optimized adsorption process. *Chemosphere*. 2022.

Nguyen, V.-T. et al. Biochar derived from the spent coffee ground for ammonium adsorption from aqueous solution. *Case Stud*. 2021.

OCDE. ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO ECONÔMICA E DESENVOLVIMENTO.(OECD,2022)

Oliveira, L.S.; Franca, A.S. Potential of spent coffee grounds as sources of dietary fiber with antioxidant activity. In *Food Waste: Practices, Management and Challenges*; Riley, G.L., Ed.; Nova Publishers: New York. 2016.

Oliveira, T. M. (2007). Desenvolvimento e avaliação de filme biodegradável de polietileno incorporado de amido de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

Peelman, N.; Ragaert, P.; Ragaert, K.; De Meulenaer, B.; Devlieghere, F.; Cardon, L. Resistência ao calor de novos materiais poliméricos de base biológica, com foco em amido, celulose, PLA e PHA. *J. Appl. Sci.* **2015**, *132*, 42305.

Ray, S. S.; Bousmina, M. Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In greening the 21st century materials world. *Progress in Materials Science*. V. 50, n. 8, 2005

Reis, N.; Botelho. et al. Simultaneous detection of multiple adulterants in ground roasted coffee by ATR-FTIR spectroscopy and data fusion. *Food Anal.* 2017.

Ribeiro, E.; de Souza Rocha, T.; Prudencio, S.H. Potential of green and roasted coffee beans and spent coffee grounds to provide bioactive peptides. *Food Chem.* 2021.

Schrooyen, P. M. M., Van Der Meer, R., De Kruif, C. G. Microencapsulation: its application in nutrition. *Proceedings of the Nutrition Society*, 60, 475–479, 2001

Sedaghat, G. et al. Sub-chronic administration of brewed coffee on rat behavior and cognition and oxidative stress Alzheimer\textquotesingles disease model. *Clin. Nutr.* 2019.

Shahabi-Ghahfarokhi, S. et al. Removal and potential recovery of dissolved metals from acid sulfate soil drainage by spent coffee-grounds and dissolved organic carbon. 2022.

Sharma, A.; Ray, A.; Singhal, RS Uma abordagem de biorrefinaria para a valorização da borra de café: Extração do óleo por dióxido de carbono supercrítico e utilização da borra desengordurada na formulação de biscoitos funcionais. *Future Foods* **2021**, *4*, 100090.

SOBRAL, P.J.A. Propriedades funcionais de biofilmes de gelatina em função da espessura. *Ciência & Engenharia*, v.8, n.1, p.60-67, 1999.

Sodhi, A.S. et al. Insights on sustainable approaches for production and applications of value added products. 2022.

Solomakou, N. et al. Recovery of phenolic compounds from spent coffee grounds through optimized extraction processes. *Sustain. Chem. Pharm.* 2022.

Terroba-Delicado, E. et al. Valorization of Liquor Waste Derived Spent Coffee Grains for the Development of Injection-Molded Polylactide Pieces of Interest as Disposable Food Packaging and Serving Materials. *Foods.* 2022,

Thiagamani, S.M. et al. Utilization of chemically treated municipal solid waste (spent coffee bean powder) as reinforcement in cellulose matrix for packaging applications. *Waste Manag.* 2017.

Vahabi, H.. *Coffee Wastes as Sustainable Flame Retardants for Polymer Materials.* 2021.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (Suiça), 2001.

Zhao, X.; Zhou, L.; Riaz, S.; Yan, L.; Jiang, C.; Shao, D.; Zhu, J.; Shi, J.; Huang, Q.; Yang, H.; Jin, M. Fungal silver nanoparticles: synthesis, application and challenges. *Critical Reviews in Biotechnology* . 2017.

Zhu, M.; Jatoi, A. Colorectal Cancer, Crohn-Like Lymphoid Reactions, Survival—And the Power of a Good Cup of Coffee! *Mayo Clin.* 2022.