

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

IAN MONTEIRO RANGEL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOMATERIAIS PRODUZIDOS
A PARTIR DE MICÉLIO FÚNGICO EM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS**

VIÇOSA – MG

2025

IAN MONTEIRO RANGEL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOMATERIAIS PRODUZIDOS
A PARTIR DE MICÉLIO FÚNGICO EM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Ciências
Biológicas da Universidade Federal de Viçosa
como requisito para a obtenção do título de
bacharel em Biologia.

Orientadora: Prof^ª Marliane de Cássia S. da
Silva
Coorientadora: Prof^ª Taíla Veloso de Oliveira

VIÇOSA – MG

2025

IAN MONTEIRO RANGEL

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOMATERIAIS PRODUZIDOS
A PARTIR DE MICÉLIO FÚNGICO EM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS**

Monografia apresentada ao Curso de Ciências
Biológicas da Universidade Federal de Viçosa
como requisito para a obtenção do título de
bacharel em Biologia.

APROVADO EM: 30/06/2025



Documento assinado digitalmente
MARLIANE DE CASSIA SOARES DA SILVA
Data: 05/07/2025 12:52:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Marliane de Cássia S. da Silva
(UFV)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, por me apoiar durante a minha vinda para Viçosa e que, mesmo longe, sempre estiveram ao meu lado quando precisei e com quem pude compartilhar todas as novas experiências que Viçosa me proporcionou.

Aos meus professores do fundamental e médio que ajudaram a moldar a pessoa que sou hoje. Agradeço principalmente aos meus professores de biologia, que me inspiraram a seguir este caminho.

Aos meus amigos e minha namorada, em quem me apoio e com quem posso contar sempre que preciso, seja nos momentos bons ou ruins.

Agradeço a minha orientadora e aos docentes da UFV que tornaram esse trabalho possível, com sugestões, apoio técnico e entusiasmo.

Por fim, a todos os seres vivos, nada disso seria possível se não fossem as plantas, animais e os microrganismos que vivem comigo.

RESUMO

RANGEL, Ian Monteiro, B.Sc, Universidade Federal de Viçosa, junho de 2025.
DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOMATERIAIS PRODUZIDOS A PARTIR DE MICÉLIO FÚNGICO EM RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS.
Orientadora: Profa Marliane de Cássia S. da Silva

A popularização de plásticos sintéticos derivados de combustíveis fósseis mudou consideravelmente a forma como os brasileiros lidam com problemas cotidianos. Esses materiais promoveram mais praticidade e conforto à população. Entretanto, a utilização em massa e indiscriminada do plástico, associada ao descarte inadequado desses materiais, têm contribuído com a poluição do meio ambiente. Em resposta a esse problema, muitas alternativas mais sustentáveis vêm sendo estudadas, e dentre elas, o desenvolvimento de biomateriais compostos por micélio fúngico e resíduos agrícolas. Os biocompósitos não demandam muita energia durante seu processo produtivo, são de fácil decomposição quando descartados e possuem propriedades moduláveis durante o crescimento do fungo. Neste trabalho foram investigados como os resíduos agrícolas afetam as características finais deste biomaterial. Foram realizados dois experimentos utilizando o fungo *Pleurotus ostreatus*, folhas de bananeira picadas, cascas de café e uma mistura de 1:1 destes dois resíduos. Os resíduos foram distribuídos em moldes e inoculados com o fungo por 20 dias. Durante esse tempo o organismo colonizou os substratos agregando e transformando resíduos em um produto com potencial de aplicação na área de materiais, a citar isolamento térmico e acústico. Posteriormente, os substratos moldados e colonizados foram secados em estufa, dimensionados e caracterizados quanto às propriedades mecânicas, por testes de compressão; índice de intumescimento; estruturais por microscopia eletrônica de varredura; e óptica, por ensaio colorimétrico. Foram obtidos materiais leves, com densidades na faixa de $130\text{-}254\text{ kg/m}^3$, resistência à compressão entre $29\text{-}268\text{ Pa}$, módulo de elasticidade entre $64\text{-}88\text{ Pa}$ e índice de intumescimento entre $39\text{-}45\%$. Por meio deste estudo, foi possível observar a influência do resíduo agrícola (folhas de bananeira, cascas de café ou sua mistura) nas propriedades mecânicas e físicas do biomaterial, de forma que a mistura entre casca de café e folha de bananeira apresentou o melhor desempenho nos ensaios mecânicos. Evidenciando sua plasticidade e potencial para aplicações sustentáveis em substituição a plásticos convencionais.

Palavras-chave: *Pleurotus ostreatus*, biomateriais, sustentabilidade.

ABSTRACT

RANGEL, Ian Monteiro, B.Sc, Universidade Federal de Viçosa, junho de 2025.
DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF BIOMATERIALS PRODUCED WITH FUNGAL MYCELIUM ON AGROINDUSTRIAL RESIDUES. Adviser: Profa Marliane de Cássia S. da Silva

The widespread adoption of synthetic plastics derived from fossil fuels has significantly altered how Brazilians address everyday challenges. These materials brought more convenience and comfort to the population, alongside a sense of luxury previously accessible only to higher-income groups. However, mass consumption and misuse of plastics have led to improper disposal and environmental pollution. In response, more sustainable alternatives are being explored, including fungal mycelium-based biomaterials combined with organic agricultural waste. These biocomposites require minimal energy for production, decompose easily, and exhibit tunable properties during fungal growth. This study examined the impact of agricultural waste on the final properties of the biomaterial. Two experiments were conducted using *Pleurotus ostreatus*, chopped banana leaves, coffee husks, and a 1:1 mixture of both residues. The substrates were placed in molds and inoculated with the fungus for 20 days. During this period, the organism colonized the substrates, transforming byproducts into a versatile material with potential applications such as thermal and acoustic insulation. The colonized samples were then oven-dried, dimensioned, and subjected to compression tests, swelling tests, scanning electron microscopy, and colorimetric analysis. The final materials were lightweight, with densities ranging from 130-254 kg/m^3 , compressive strength of 29-268 Pa, young modulus of 64-88 Pa, and swelling index of 39-45%. The findings reveal that the choice of agricultural residue directly impacts the material's properties and in this instance the mix between coffee husks and banana leaves had the best performance on the mechanical tests. Highlighting the biomaterial customizable potential for sustainable applications as an alternative to conventional plastics.

Keywords: *Pleurotus ostreatus*, biomaterials, sustainability

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1	Materiais poliméricos	2
2.2	Micélio e <i>Pleurotus ostreatus</i>	4
2.3	Resíduos agroindustriais.....	5
3	OBJETIVOS	6
3.1	Objetivos específicos	6
4	MATERIAL E MÉTODOS	8
4.1	Isolados fúngicos	8
4.2	Montagem, crescimento e inativação dos blocos miceliais	8
4.2.1	Experimento 1.....	9
4.2.2	Experimento 2.....	9
4.3	Caracterização física das amostras.....	11
4.4	Ensaio de compressão	11
4.5	Ensaio colorimétrico	12
4.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	12
4.7	Índice de intumescimento (II).....	12
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
5.1	Crescimento dos blocos.....	13
5.1.1	Experimento 1.....	13
5.1.2	Experimento 2.....	16
5.2	Características dimensionais	18
5.3	Características mecânicas.....	20
5.4	Colorimetria.....	25
5.5	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	26
5.6	Índice de intumescimento (II).....	28
6	CONCLUSÃO	29
	REFERÊNCIAS	30

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Montagem do Experimento 2 (3 tratamentos, 7 repetições). Casca de café (CA), Folha de bananeira (BA) e Casca de café + Folha de bananeira (CB).....	10
Figura 2 - Imagens mostrando o processo de crescimento dos blocos miceliais. (A) Blocos logo após inoculação, onde CB: casca + folha, BA: folha de bananeira, CA: casca de café; (B) Blocos no quarto dia de colonização; (C) Blocos após retirada dos sacos de PP; (D) Vista frontal dos blocos.....	14
Figura 3 - Blocos miceliais com corpos de frutificação de <i>P. ostreatus</i> . (CB) Folha de bananeira + casca de café; (CA) Casca de café; (BA) Folha de bananeira.	14
Figura 4 - Em (A) detalhes dos blocos (colonizados com <i>P. ostreatus</i>) antes da secagem; (B) Blocos dentro do forno/estufa. (CB) Folha de bananeira + casca de café; (CA) Casca de café; (BA) Folha de bananeira.	15
Figura 5 - Aspecto visual dos blocos colonizados por <i>P. ostreatus</i> , 7 dias após primeira secagem e armazenamento. (CB) Folha de bananeira + casca de café; (CA) Casca de café; (BA) Folha de bananeira. Repetições de 1-5.....	15
Figura 6 - Parte inferior das repetições de 1-7, dos tratamentos com folha de bananeira (BA), casca de café (CA) e mistura de folha e casca (CB) nos moldes de PVC após 20 dias de colonização por <i>P. ostreatus</i>	16
Figura 7 – Moldes de PVC preenchidos com resíduos agrícolas (folha de bananeira – BA; casca de café – CA; mistura de folha e casca – CB) colonizados por <i>P. ostreatus</i> ; (A) Parte superior dos moldes; (B) Parte lateral dos moldes.	17
Figura 8 – Amostras fora dos moldes de PVC, após colonização por <i>P. ostreatus</i> (folha de bananeira – BA; casca de café – CA; mistura de folha e casca – CB).	17
Figura 9 - Gráfico correlacionando a densidade (eixo y) com os tratamentos (eixo x) do segundo experimento.	19
Figura 10 - Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x), das amostras de CA.....	21
Figura 11 - Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x), das amostras de BA.....	22
Figura 12 - Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x), das amostras de CB.....	24
Figura 13 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura do micélio de <i>P. ostreatus</i> em substratos de folha de bananeira (A e B), casca de café (C e D) e mistura de folha e casca (E e F).....	27
Figura 14 – Amostras submersas dos blocos colonizados por <i>P. ostreatus</i> (A), amostras submersas após 2 h (B). (1) Folha de bananeira + casca de café; (2) Casca de café; (3) Folha de bananeira.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de substrato (em gramas) utilizado nos moldes, por tratamento, em 7 repetições. Casca de café (CA), Folha de bananeira (BA) e Casca de café + Folha de bananeira (CB).	10
Tabela 2 - Medidas dos corpos de prova avaliados no 1º experimento.	18
Tabela 3 - Velocidade de carregamento e valores máximos de força, deslocamento, tensão, módulo de elasticidade e energia de deformação para as amostras no tratamento CA.	21
Tabela 4 - Velocidade de carregamento e valores máximos de força, deslocamento, tensão, módulo de elasticidade e energia de deformação para as amostras no tratamento BA.	23
Tabela 5 - Velocidade de carregamento e valores máximos de força, deslocamento, tensão, módulo de elasticidade e energia de deformação para as amostras no tratamento CB.	24
Tabela 6 - Dados do ensaio colorimétrico a partir do primeiro experimento. (CB) Folha de bananeira + casca de café; (CA) Casca de café; (BA) Folha de bananeira.	26
Tabela 7 - Índice de intumescimento dos blocos de casca de café (CA), folha de bananeira (BA) e mistura de folha e casca (CB) colonizados com <i>P. ostreatus</i>	28

1 INTRODUÇÃO

A popularização dos polímeros derivados do petróleo, na década de 50, trouxe uma nova realidade para o Brasil ao substituírem materiais como o marfim, a madeira e o papel pelos objetos plásticos, na forma de utensílios domésticos e de embalagens. A produção e a comercialização mais dos plásticos, a um custo mais acessível, aliada a promoção midiática de um novo estilo de vida, popularizaram o consumo deste material. Contudo, apesar da praticidade e do amplo consumo, o uso dos plásticos tem levantado questionamentos com relação aos impactos ambientais em função do emprego do material em excesso e pelo descarte inadequado no o meio ambiente (Modelli, 2019).

A decomposição de materiais poliméricos derivados do petróleo, como poliestireno e poliuretano, ocorre ao longo de muitos anos, principalmente quando feito de forma indiscriminada. Assim, a substituição desses materiais por alternativas mais sustentáveis pode diminuir os impactos socioambientais de geração de resíduos e de poluentes. Como alternativa, podemos citar o desenvolvimento de materiais biodegradáveis, que utilizam polímeros naturais, como a lignina e as fibras naturais, como bagaço de cana, fibras de algodão, a casca de café e a folha de bananeira. (Sydor, 2022; Yang, 2017).

O desenvolvimento de biomateriais pode empregar várias metodologias e, entre as quais se destaca a cultura de micélio fúngico para formação de estruturas tridimensionais. Os fungos, organismos eucariontes pertencentes ao reino Fungi, produzem hifas, que se entrelaçam formando o micélio. Essa rede filamentosa se agrega às fibras e outros resíduos orgânicos produzindo um material que, após secagem, é leve, inerte e isolante, com propriedades semelhantes ao poliestireno expandido. Em contrapartida, diferentemente dos plásticos sintéticos, este material é de fácil decomposição, cujo descarte permite a reintegração dos compostos ao ciclo natural da matéria orgânica (Alemu *et al.*, 2022; Ali *et al.*, 2025; Elsacker *et al.*, 2019).

No entanto, biomateriais compósitos de micélio apresentam alta variabilidade em suas propriedades (Holt *et al.*, 2012), influenciando diretamente suas aplicações. Essas variações podem estar atreladas aos materiais empregados para o cultivo do micélio.

Diante do exposto, questiona-se: o substrato de cultivo fúngico pode afetar as características do material biocompósito? E de que forma essa escolha interfere no desempenho e aplicação do material? Apesar da importância dessas questões, ainda há uma lacuna na literatura sobre biocompósitos de micélio, fazendo-se necessários estudos para investigar e viabilizar a utilização em larga escala desses materiais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Materiais poliméricos

Os plásticos produzidos atualmente derivam, em sua maioria, de combustíveis fósseis não renováveis. Em 2023, a produção mundial destes materiais foi de 374.2 Mt, sendo maior que a do ano anterior. Materiais derivados do petróleo apresentam várias características vantajosas para serem aplicados na indústria alimentícia, hospitalar, automobilística e em muitas outras áreas que permeiam o cotidiano, contudo, apenas 9% deste material tem sido reutilizado ou reciclado (Plastics Europe, 2023; 2024). Os materiais que não são incorporados na economia circular são descartados, majoritariamente, de forma incorreta e permanecem no ambiente por muito tempo, apresentando vários riscos aos ecossistemas globais, como a liberação de microplásticos no ambiente e o acúmulo desses materiais em ecossistemas aquáticos Holt *et al.* 2012).

A difícil degradação de derivados do petróleo, como o poliestireno expandido (EPS), quando aplicado a objetos cotidianos produzidos em grande escala e altamente descartáveis, como marmitas para transporte de alimento, torna-se um problema. Apesar da reciclagem destes materiais ser uma alternativa ecológica, atualmente, o principal destino do poliestireno ocorre em aterros sanitários e na incineração desses produtos, cujas práticas não são sustentáveis. A incineração de EPS pode liberar gases tóxicos no ambiente e a manutenção de aterros sanitários, além de custosa, pode levar à contaminação de lençóis freáticos (Wei; Zimmermann, 2017; Luz *et al.*, 2023; Petkoska *et al.*, 2021).

Neste contexto, tecnologias para reutilização de produtos de poliestireno expandido já foram propostas (Prasittisopin; Termkhajornkit; Kim, 2022), mas estão muito aquém do necessário para solucionar o atual problema ambiental causado pela elevada quantidade de materiais descartáveis à base de EPS. Além da falta de sustentabilidade ambiental, as atuais formas de reciclagem de materiais derivados do petróleo não são economicamente interessantes para a indústria, quando comparado com a produção de plásticos derivados de matéria prima virgem (Center for Climate Integrity, 2024).

Outras alternativas à produção e ao uso de polímeros sintéticos incluem o emprego de materiais poliméricos derivados de recursos renováveis e naturais, como a lignina. Contudo, mesmo o uso destes materiais possui desafios que devem ser superados, para a lignina, as limitações incluem odor forte e característico, estrutura química heterogênea, recalcitrância à

despolimerização sistemática e a produção de estruturas aromáticas complexas ao longo de sua degradação (Sethupathy *et al.*, 2022), corroborando com o observado por Haneef *et al.* (2017), ao discutir o desenvolvimento de hidrogéis obtidos a partir de lignina. Portanto, os autores propuseram o desenvolvimento de compósitos produzidos a partir de micélio fúngico como uma nova alternativa aos materiais sintéticos derivados do petróleo e dos biomateriais existentes. Os compósitos fúngicos possuem propriedades modificáveis durante o período de crescimento micelial, podendo ser fabricado utilizando metodologias e recursos mais baratos, como por exemplo, pelo emprego de resíduos agrícolas.

Também evidenciado por Kinyanjui *et al.* (2023), há uma necessidade crescente de priorizar o desenvolvimento de materiais de “baixo carbono” para estar em consonância com a tendência de processos sustentáveis. Os autores afirmaram que uma das formas de suprir essa questão é com a utilização de materiais derivados de matéria orgânica, como madeira e bambu. Para além disso, é colocado no estudo que o micélio fúngico surge como um bom aglutinador biológico para agregar resíduos lignocelulósicos ou agroindustriais, formando biomateriais compósitos sólidos e concisos.

Corroborando com estes achados, o trabalho de Vandeloos *et al.* (2021) compilou os resultados de trabalhos que desenvolveram materiais à base de fungos filamentosos para aplicação em diversos setores industriais (produção de embalagens, tecidos análogos ao couro, caixões e etc.) e indicaram as perspectivas para o futuro das técnicas que incorporam estes organismos no processo produtivo. Os autores delimitam a diferença entre materiais compósitos com micélios (*composite mycelium materials* - CMM) e materiais feitos apenas com micélio puro (*pure mycelium materials* - PMM).

Os materiais CMM, produzidos a partir de substratos orgânicos, resultam em produtos finais semelhantes ao poliestireno expandido, sendo ideal para o desenvolvimento de embalagens e materiais para isolamento (térmico e acústico). Por outro lado, os PMM, por serem feitos apenas com micélio, possuem maior aplicabilidade, como alternativa vegana para carne, tecido análogo ao couro e espumas cuja fabricação não é possível utilizando CMM. Os PMM são moldados principalmente pelo organismo escolhido e pelas condições de crescimento ao qual é submetido, sem depender de substrato orgânico.

O processo de fabricação de CMM é semelhante ao processo padrão para frutificação de cogumelos utilizando sacolas de polipropileno. A princípio, o fungo escolhido é inoculado em placa de petri com meio de cultura Batata Dextrose Ágar (BDA), onde é incubado em condições delimitadas pelo fungo escolhido até colonização total da placa, por cerca de 14 dias.

Um pequeno pedaço deste micélio é transferido para o substrato orgânico estéril e então é incubado novamente. Por fim, o substrato totalmente colonizado é submetido a alta temperatura, por várias horas, a depender do produto, para secagem e inativação do fungo filamentoso. Apesar do relatado na literatura, ainda não há um método padronizado para produção de biocompósitos de micélio, tendo em vista que ainda é um campo de estudo relativamente novo (Yang; Park; Qin, 2021).

Diante do exposto, ressalta-se que a inovação destes materiais se deve ao fato de empregar os fungos como parte da matriz do biomaterial, tornando as características do produto únicas e diferenciadas. Dentre os fungos existentes, os mais recorrentes utilizados para fabricação de biomateriais compostos fazem parte de apenas três gêneros: *Ganoderma*, *Pleurotus* e *Trametes*, dentre estes, *Pleurotus ostreatus* se destaca, estando presente em 12% dos 47 estudos analisados por Attias *et al.* (2020). Dessa forma, a compreensão das características da espécie do fungo é muito importante para a produção de um material com as propriedades compatíveis à aplicação.

2.2 Micélio e *Pleurotus ostreatus*

O fungos filamentosos são organismos eucariontes, que podem possuir um ou mais núcleos por célula, e se organizam em hifas, parte vegetativa, e parte reprodutiva, que varia em morfologia a depender do clado. As hifas podem ser septadas, apresentando vários espaços celulares separados por septos, ou não septadas, com uma única célula contínua e ramificada. *Pleurotus ostreatus*, popularmente conhecido como shimeji, é um fungo pertencente ao filo dos Basidiomycota, ordem Agaricales e família Pleurotaceae. Suas hifas são septadas e sua frutificação é constituída por uma estrutura macroscópica denominado basidioma comumente chamada de cogumelo (Silveira, 1995).

O cultivo de *Pleurotus ostreatus* representa grande importância no mercado mundial de cogumelos comestíveis, sendo uma das três espécies de fungos mais cultivadas no mundo, seguido de *Agaricus bisporus* e *Lentinula edodes*. Seu cogumelo também possui alto valor nutricional, com compostos bioativos benéficos à saúde humana, como beta-glucanos e compostos fenólicos, de forma que há décadas este fungo se tornou o foco de muitas pesquisas (Silva *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2023).

Isolados silvestres de *P. ostreatus* já foram descritos no Brasil e seu cultivo ocorre nos mais diversos substratos, como *Pinus* sp., sementes de açaí, capim elefante e cascas de castanha-do-pará. Também é importante ressaltar que, apesar da grande popularidade de *P. ostreatus*,

existem muitas outras espécies com potencial econômico ainda inexplorado. No Brasil, estima-se que existam cerca de 24 a 46 mil espécies de cogumelos a serem descritas, das quais, cerca de 1.900 a 3.500 são espécies formadoras de cogumelos comestíveis. (Menolli *et al.*, 2025)

Além de sua importância econômica, *P. ostreatus* tem grande importância ecológica. Por ser um fungo saprófita, ele possui papel fundamental na decomposição e reciclagem de materiais lignocelulósicos, principalmente em ecossistemas florestais. Apesar disso, *P. ostreatus* não é constituído por uma única espécie, mas faz parte de um complexo de espécies muito parecidas morfológicamente, que são comumente confundidas entre si. Análises moleculares com diversos fungos pertencentes a este complexo evidenciaram que a diversificação do gênero *Pleurotus* começou a ocorrer no período Jurássico (153 Ma), e apenas ao final do Eoceno (39 Ma), no leste Asiático, houve o surgimento do primeiro ancestral comum ao complexo de espécies do *P. ostreatus*. Ademais, o período de ocorrência da maior diversificação do grupo (32 Ma) coincide com o soerguimento do planalto tibetano. Portanto, acredita-se que os eventos derivados deste soerguimento foram possíveis fatores que impulsionaram tal ramificação (Li *et al.*, 2020). Apesar dos novos achados apresentados, *P. ostreatus* será tratado como uma única espécie neste trabalho para facilitar a compreensão.

Além disso, *P. ostreatus* faz parte dos fungos da podridão branca, que é um grupo ecológico composto por basidiomicetos, como o *Ganoderma lucidum*, com capacidade de degradar compostos lignocelulósicos (Bautista-Zamudio *et al.*, 2023; Voběrková *et al.*, 2018).

De acordo com uma revisão de Ghazvinian e Gürsoy (2022b), para o desenvolvimento e exploração dos usos de CMM, alguns pesquisadores utilizaram fungos exclusivos da empresa *Ecovative* (Green Island, Nova Iorque). Contudo, o gênero *Pleurotus* se destacou nos estudos, principalmente pelo crescimento mais rápido das espécies presentes neste grupo quando comparadas com outros basidiomicetos.

O crescimento fúngico depende de temperatura, umidade, e principalmente, do substrato no qual é cultivado. Substratos com diferentes composições químicas e características mecânicas alteram o comportamento fúngico e as propriedades do biomaterial e devem ser estudadas no processo de desenvolvimento de produtos dessa natureza.

2.3 Resíduos agroindustriais

O Brasil é um país de grandes proporções, cujas terras permitem a produção de muitas culturas agrícolas em larga escala, com capacidade suficiente para abastecer o mercado global

de forma substancial. Dentre os cultivares, destaca-se a banana e o café, por estarem entre as dez culturas com maior valor de produção agregado (IBGE 2023).

Foram produzidos, em 2023, 6.825 milhões de toneladas de cachos de banana e 3.405 milhões de grãos de café em todo território brasileiro. Estes valores estão diretamente ligados à produção de resíduos associados com esses cultivares, como folhas dos pés de bananeira e cascas provenientes do processamento dos grãos de café (IPEA, 2012). Tal quantidade de resíduos orgânicos gerados torna seu impacto ambiental alarmante, caso sua disposição final seja feita de forma incorreta. Além disso, os resíduos representam perdas de matérias-primas e energia, sendo então seu reaproveitamento uma alternativa para mitigar os efeitos negativos de sua disposição incorreta (Cordeiro *et al.*, 2020).

A utilização da casca de café e da folha de bananeira, para produção de biomateriais, é considerada uma alternativa de destinação desses resíduos da indústria agrícola. Para além da importância de aproveitamento de recursos, a produção de biomateriais a partir de resíduos agrícolas está de acordo com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 12 (ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis), estabelecido pelas Nações Unidas como “um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade” (Nações Unidas no Brasil, 2025). Diante desse potencial e da ausência de padronização na produção de compósitos de micélio, esse estudo evidencia algumas relações entre matéria-prima e propriedades do material, cujos objetivos são detalhados a seguir.

3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e caracterizar biomateriais à base de resíduos agroindustriais e micélio de *Pleurotus ostreatus*.

3.1 Objetivos específicos

- Desenvolver biomateriais a partir de resíduos agroindustriais (folha de bananeira, casca de café e folha de bananeira + casca de café) e micélio de *Pleurotus ostreatus*;
- Caracterizar os materiais quanto às suas propriedades físicas, mecânicas, estruturais e ópticas;
- Avaliar o efeito da fonte de resíduo nas propriedades físicas, mecânicas e ópticas do biomaterial.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Associações Micorrízicas (LAMIC) do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO), no Departamento de Microbiologia (DMB) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Minas Gerais.

As análises de caracterização foram realizadas no Laboratório de Embalagens (LABEM), associado ao Departamento de Tecnologia de Alimentos (DTA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais, e no Laboratório de Ensaaios Mecânicos (LEM), associado ao Departamento de Engenharia Civil da UFV.

4.1 Isolados fúngicos

Isolados de *Pleurotus ostreatus*, identificado como PLO 02, associado à coleção do Laboratório de Associações Micorrízicas / DMB / BIOAGRO / UFV foram utilizados neste trabalho.

As amostras foram cultivadas em placas de Petri contendo meio batata dextrose ágar (BDA) a 25 ± 2 °C por 7 dias. A inoculação nos meios de cultura foi feita a partir de discos miceliais retirados da placa de Petri incubada em BOD a 25 ± 2 °C, contendo o micélio do isolado PLO 02. Os fungos foram inoculados novamente em frascos de vidro contendo sementes de sorgo, para produção dos inóculos (Ribeiro, 2009).

4.2 Montagem, crescimento e inativação dos blocos miceliais

Os substratos utilizados para produção dos blocos miceliais foram folhas de bananeira, casca de café e uma mistura na proporção de 1:1 destes dois resíduos. As folhas de bananeira foram submersas em água potável por 1 h, depois peneiradas (malha 10) para remoção da água e centrifugadas (CRB1, Britânica) a 1200 rpm por 1 min, à temperatura ambiente (25 ± 2 °C), retirando o excesso de água. Paralelamente, as cascas de café foram submersas e fervidas em água potável por 1 h e depois despejadas em peneira (malha 10) e posteriormente centrifugadas a 1200 rpm por 1 min, a temperatura ambiente (25 ± 2 °C), retirando o excesso de água. O teor de umidade final foi calculado como a razão entre a massa de água contida em uma quantidade do substrato e a massa da parte sólida existente nessa mesma quantidade (Instituto Adolfo Lutz, 1985). Após a centrifugação, o teor de umidade dos substratos foi de 286% para a folha de bananeira e 212% para a casca de café.

4.2.1 Experimento 1

As variáveis preditoras avaliadas neste experimento foram os tipos de substratos utilizados. O experimento foi realizado seguindo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 3 tratamentos e 5 repetições, totalizando 15 amostras.

Foram utilizados 500 g de cada substrato para preenchimento de sacos de polipropileno com filtro integrado próprios para cultivo de cogumelos (Figura 2(A)). A formulação da mistura de casca de café e da folha de bananeira foi feita utilizando 250 gramas de cada resíduo por sacola. Os sacos foram vedados com fita crepe e autoclavados duas vezes, para eliminação de possíveis contaminantes, a 121 ± 2 °C, por 40 minutos, com um intervalo de 72 horas entre as autoclavagens. Após autoclavagem, os substratos foram inoculados utilizando 50 g de grãos de sorgo colonizados pelo micélio fúngico e incubados em temperatura ambiente (25 ± 2 °C), na ausência de luz, por 15 dias contados a partir do dia de inoculação.

Após os 15 dias, os sacos de polipropileno (PP) foram removidos para que o micélio colonizado no substrato pudesse crescer superficialmente ao bloco e foram mantidos por 5 dias, em temperatura ambiente (25 ± 2 °C) e ausência de luz. Os blocos foram secados em estufa de secagem (Fanem 315-SE), a 100 ± 2 °C, por 2h, para a inativação dos microrganismos, mas mantendo a estrutura molecular das hifas (Yang; Park; Qin, 2021; Holt *et al.*, 2012). Após a secagem, os blocos foram armazenados em caixas de isopor, em ambiente limpo e refrigerado a 22 ± 2 °C, por 7 dias. Como consequência do crescimento de contaminantes em sua superfície, materiais foram retirados das caixas de isopor, sua superfície foi raspada utilizando uma espátula esterilizada com álcool 70% e, por fim, foram secados novamente a 100 ± 2 °C, por 1h, para inativação de agentes decompositores presentes na superfície dos blocos. Estes foram armazenados na estufa de secagem desligada até que fossem realizadas as análises físicas, ópticas e estruturais.

4.2.2 Experimento 2

O preparo dos substratos para o segundo experimento foi feito seguindo a metodologia descrita acima, com variações nas quantidades de resíduos (Tabela 1) e no molde utilizado.

Tabela 1 - Quantidade de substrato (em gramas) utilizado nos moldes, por tratamento, em 7 repetições. Casca de café (CA), Folha de bananeira (BA) e Casca de café + Folha de bananeira (CB).

Peso (gramas)/Repetições							
Tratamento	1	2	3	4	5	6	7
CB	41	40	41	42	41	43	41
CA	41	42	42	43	40	41	43
BA	35	35	35	37	34	36	36

Os corpos de prova foram moldados em canos de PVC de formato cilíndrico, com diâmetro interno aproximado de 4 cm e comprimento aproximado de 10 cm. Os moldes foram preenchidos com os substratos nas proporções listadas na Tabela 2, em 7 repetições (Figura 1). Os moldes foram vedados com papel filtro na parte superior e com plástico filme (PVC plastificado) na parte inferior e então colocados em sacos de PP, separados por tratamento. Os sacos de PP foram autoclavados duas vezes, a 121 ± 2 °C, por 40 minutos, com intervalo de 24 h entre as autoclavagens.

Figura 1 - Montagem do Experimento 2 (3 tratamentos, 7 repetições). Casca de café (CA), Folha de bananeira (BA) e Casca de café + Folha de bananeira (CB)



Após o processo de esterilização, os resíduos nos moldes foram inoculados com 4 g de sementes de sorgo colonizadas por *P. ostreatus* e mantidos em sala escura, sob temperatura

ambiente (25 ± 2 °C) durante 20 dias, até a secagem. Após colonização os blocos foram retirados dos moldes e mantidos em estufa de secagem (Fanem 320-SE), a $70^\circ\text{C} \pm 2$, por 4 h. As amostras foram armazenadas em estufa de secagem desligada até a realização das análises estruturais e mecânicas.

4.3 Caracterização física das amostras

No primeiro experimento, amostras de formato retangular, com dimensões de aproximadamente (3 cm x 3 cm x 3 cm), foram cortadas em posições aleatórias, com o auxílio de um bisturi. No segundo experimento, todas as repetições de cada tratamento foram medidas com o auxílio de régua e paquímetro. As massas das amostras de ambos experimentos foram determinadas em balança de precisão (MARTE AD1000) para estimativa da densidade a partir da seguinte fórmula:

$$p = m \div v$$

Em que **p** = densidade; **m** = massa; **V** = volume (Tabela 1).

4.4 Ensaio de compressão

O ensaio foi realizado nas sete amostras dos tratamentos CA e BA, e nas seis amostras do tratamento CB, produzidas no segundo experimento, cujas dimensões foram de aproximadamente 80 mm de comprimento e 40 mm de diâmetro. Para realização da análise, os corpos de prova foram posicionados de forma vertical, individualmente, e alinhados com o centro da máquina de ensaio universal, EMIC DL 60000. As análises foram conduzidas no Laboratório de Ensaio Mecânicos, do Departamento de Engenharia Civil, UFV. Foi utilizada uma célula de carga de 500 N e um sensor de deslocamento, acoplados ao equipamento de ensaio mecânico para medição de compressão, para avaliar a deformação das amostras. Foram definidas velocidades de carregamento de 1,2 mm/min; 2,4 mm/min; 3,6 mm/min para o tratamento CA e foi adotada uma velocidade de carregamento 7,2 mm/min para os tratamentos BA e CB. A tensão foi calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$s = P \div A$$

(s = força por unidade de área, em Pa; P = peso sob a amostra, em N; A = área da amostra).

Além disso, foi determinado o módulo de elasticidade (módulo de Young), que é uma variável diretamente proporcional à rigidez do material, seguindo a seguinte fórmula:

$$E = s/e$$

(E = módulo de Young/elástico; s = força por unidade de área/tensão; e = deformação unitária sofrida pelo material)

Por fim, partindo-se do valor da área da curva de tensão por deformação foi possível quantificar a energia de deformação.

4.5 Ensaio colorimétrico

A cor da superfície dos corpos de prova foi analisada em colorímetro (ColorQuest XE, HunterLab, Reston, VA, EUA), conforme a metodologia adaptada de Espitia *et al.* (2013). Foram avaliados luminosidade ($*L$), variação do vermelho ao verde ($*a$) e variação do amarelo ao azul ($*b$), tendo como base a escala CIELAB 10 * /D65. Os atributos de índice de brancura (Y Branco) e de escuro (Y Preto) e opacidade (OP) foram calculados com base nos valores determinados de $*L$, $*a$ e $*b$ para cada tratamento.

4.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A superfície dos corpos de prova foi avaliada também com a utilização de um microscópio eletrônico de varredura (TM3000, Hitachi, Japão). Para cada tratamento, uma amostra foi fixada a um suporte metálico, com auxílio de uma fita de carbono com revestimento duplo, e a análise realizada sob vácuo, modo automático, e magnificação de 100 e 1000 vezes. A análise foi conduzida no Laboratório de Embalagens, Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa.

4.7 Índice de intumescimento (II)

A metodologia descrita foi adaptada de Espitia *et al.* (2013). As amostras, previamente pesadas (mi), de dimensões indicadas na Tabela 1, foram colocadas em béqueres e submergidas em 100 mL de água ultrapura, onde permaneceram por 2 h, em temperatura ambiente (25 ± 2

°C). Posteriormente, o excesso de água foi removido com o auxílio de papel toalha e as amostras intumescidas foram novamente pesadas (mf). O Índice de intumescimento foi determinado pela relação entre a massa inicial (mi) e a massa da amostra intumescida (mf), de acordo com a equação abaixo:

$$SD = [(mf - mi) \div mf] * 100$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

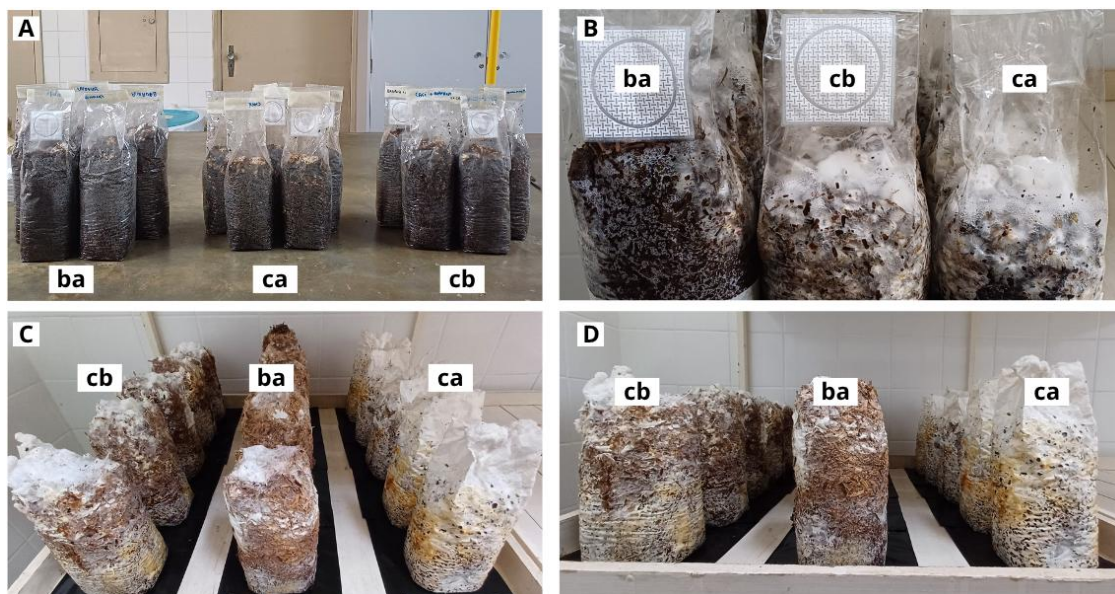
5.1 Crescimento dos blocos

5.1.1 Experimento 1

O primeiro experimento consistiu no desenvolvimento de blocos compostos por casca de café, folha de bananeira e uma mistura entre estes dois resíduos, estruturados com micélio do fungo *P. ostreatus*.

Foi observado um rápido crescimento de *P. ostreatus*, seguido de colonização do substrato. Ao quarto dia foi possível notar o crescimento saudável dos micélios e maior colonização nos tratamentos CA e CB (Figura 2B). No décimo sexto dia o fungo já havia colonizado por completo os substratos em todas as repetições. Neste período o tratamento CA apresentou visualmente uma quantidade maior de micélio e primórdios de cogumelos (Figura 2C). Para que o organismo pudesse crescer superficialmente no biomaterial, os sistemas foram retirados da sacola de PP. Após a retirada dos sacos, não foi notado uma maior colonização micelial da área superficial dos blocos. Contudo, ocorreu desenvolvimento dos primórdios, que são estruturas que surgem anteriormente à formação dos cogumelos.

Figura 2 - Imagens mostrando o processo de crescimento dos blocos miceliais. (A) Blocos logo após inoculação, onde CB: casca + folha, BA: folha de bananeira, CA: casca de café; (B) Blocos no quarto dia de colonização; (C) Blocos após retirada dos sacos de PP; (D) Vista frontal dos blocos.



Durante a condução do experimento, foi possível observar que ocorreu uma produção expressiva de cogumelos, principalmente nos tratamentos CA e CB (Figura 3). Estes corpos de frutificação foram retirados e os blocos foram submetidos a secagem, cujo resultado pode ser observado na Figura 4. Essa frutificação provavelmente foi impulsionada pelo estresse gerado com a remoção do saco de PP dos blocos miceliais e pela mudança abrupta de condições climáticas externamente à casa de vegetação.

Figura 3 - Blocos miceliais com corpos de frutificação de *P. ostreatus*. (CB) Folha de bananeira + casca de café; (CA) Casca de café; (BA) Folha de bananeira.

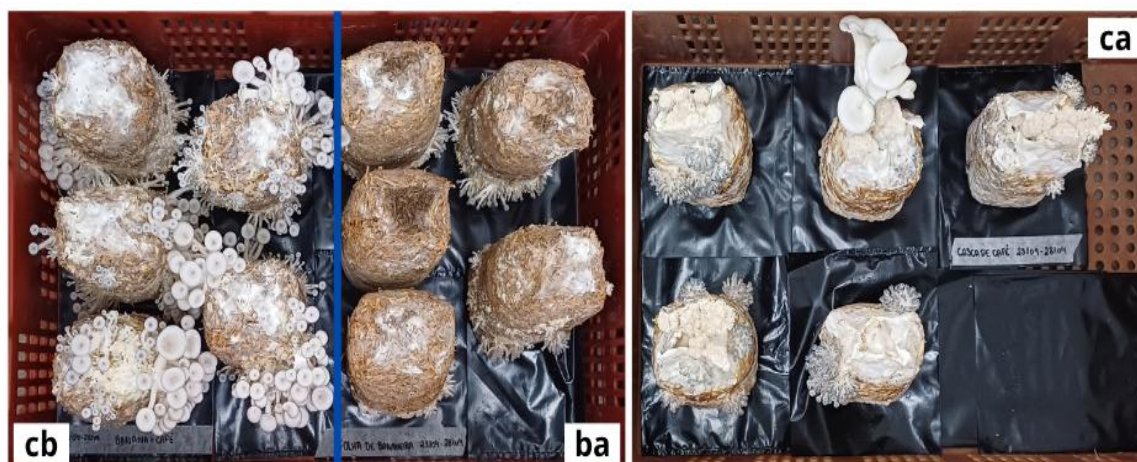
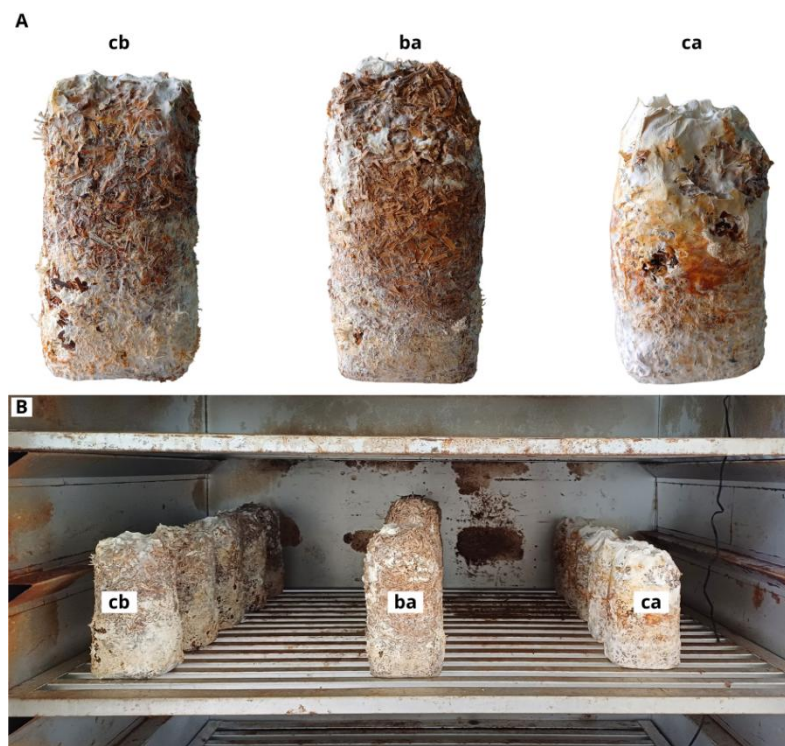
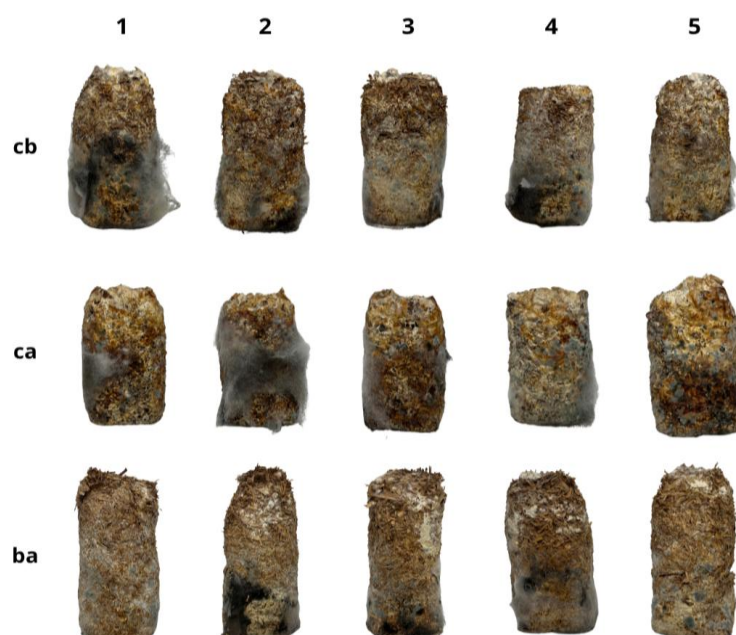


Figura 4 - Em (A) detalhes dos blocos (colonizados com *P. ostreatus*) antes da secagem; (B) Blocos dentro do forno/estufa. (CB) Folha de bananeira + casca de café; (CA) Casca de café; (BA) Folha de bananeira.



Sete dias após secagem os blocos absorveram umidade do ambiente e houve crescimento de outros microrganismos na superfície (Figura 5).

Figura 5 - Aspecto visual dos blocos colonizados por *P. ostreatus*, 7 dias após primeira secagem e armazenamento. (CB) Folha de bananeira + casca de café; (CA) Casca de café; (BA) Folha de bananeira. Repetições de 1-5.



A absorção de umidade provavelmente ocorreu pela umidade relativa do ambiente e pela atividade microbiana nos blocos, derivada da degradação dos substratos. Após a inativação do micélio de *P. ostreatus*, outros fungos filamentosos colonizaram os biomateriais, possivelmente advindos do ambiente, representantes dos gêneros *Penicillium*, *Mucor*, *Rhizopus* e *Aspergillus*, que são contaminantes comumente encontrados durante a produção de cogumelos comestíveis (Ghimire *et al.*, 2021).

5.1.2 Experimento 2

No segundo experimento, foi feito o acompanhamento da colonização do fungo *P. ostreatus* nos substratos, por 20 dias (Figuras 6, 7 e 8), seguido de secagem para formação do material estruturado com micélio. O aspecto visual da colonização foi condizente com os resultados do primeiro experimento. A colonização dos substratos ocorreu de forma irregular. Os resíduos em contato com as sementes de PLO 02 foram mais rapidamente colonizados e só foi possível observar crescimento micelial na parte inferior dos moldes (Figura 6), ao final do período de colonização. Ademais, o crescimento micelial na parte externa dos canos de PVC sugere que o micélio foi capaz de consumir parcialmente o papel filtro.

Figura 6 - Parte inferior moldes de PVC dos tratamentos com folha de bananeira (BA), casca de café (CA) e mistura de folha e casca (CB), as repetições estão indicadas de 1 a 7, após 20 dias de colonização por *P. ostreatus*.



O micélio de *P. ostreatus* cresceu ultrapassando o papel filtro na parte superior e agregou junto aos moldes (Figura 7), com destaque para os sistema com a casca de café (CA), cujo fenômeno foi mais aparente. Também foi possível observar que no tratamento CA ocorreu

a formação de primórdios (Figura 7). O aspecto branco do micélio (Figura 7 e 8), contrastando com a cor dos substratos, foi a confirmação de uma colonização mais densa no tratamento CA, seguido por CB e BA.

Figura 7 – Moldes de PVC preenchidos com resíduos agrícolas (folha de bananeira – BA; casca de café – CA; mistura de folha e casca – CB) colonizados por *P. ostreatus*; (A) Parte superior dos moldes; (B) Parte lateral dos moldes.

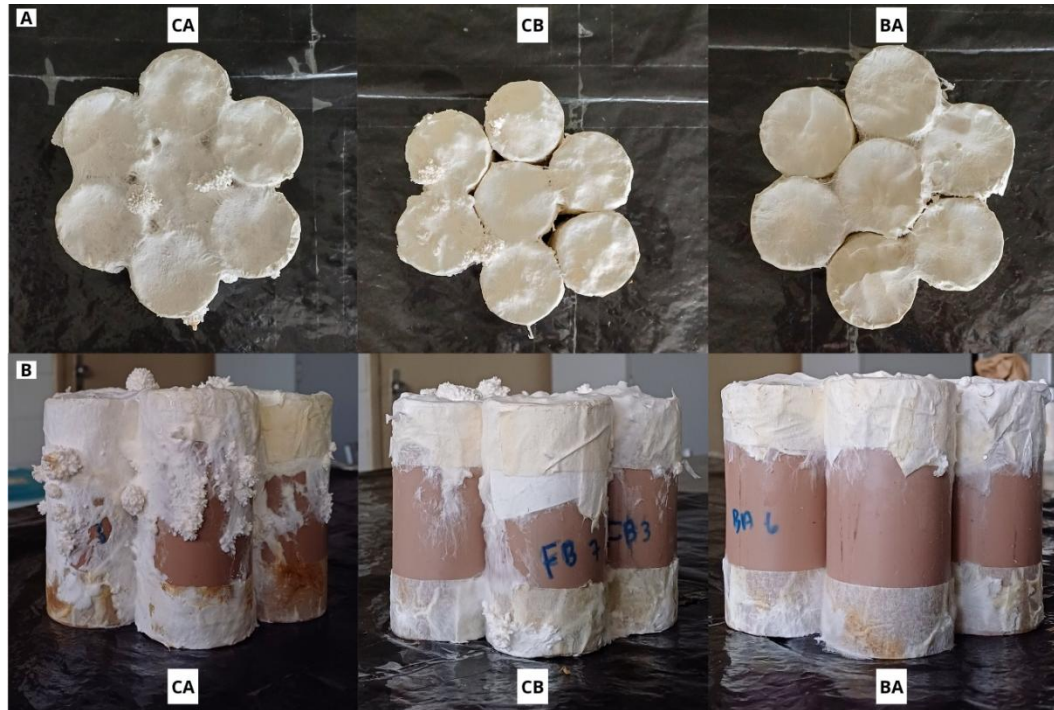


Figura 8 – Amostras fora dos moldes de PVC, após colonização por *P. ostreatus* (folha de bananeira – BA; casca de café – CA; mistura de folha e casca – CB).



5.2 Características dimensionais

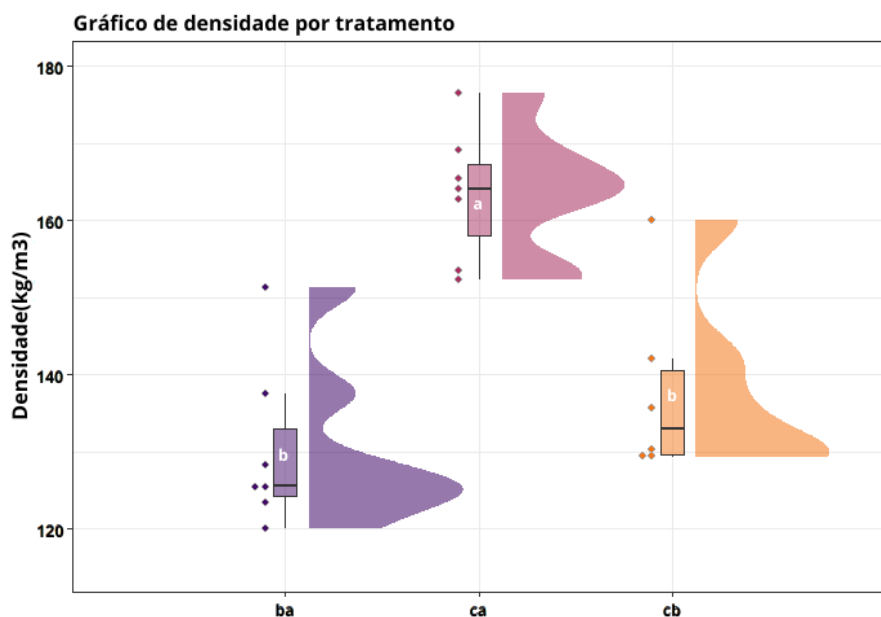
As dimensões do corpo de prova, a massa, e a estimativa do volume e da densidade dos corpos de prova do experimento 1 podem ser observados pela Tabela 2. O tratamento com menor densidade foi o CA ($190,72 \text{ kg/m}^3$), seguido de CB ($202,47 \text{ kg/m}^3$) e BA ($254,35 \text{ kg/m}^3$) (Tabela 1). A maior densidade observada para o tratamento de folha de bananeira pode estar relacionada com a quantidade de água presente nos blocos. Como a folha de bananeira ocupa um maior volume os blocos no primeiro experimento ficaram com tamanho maior em comparação aos tratamentos de casca de café e a mistura dos resíduos. Esse maior tamanho pode ter resultado em uma secagem irregular e por consequência um maior teor de água e maior densidade no tratamento BA.

Tabela 2 - Medidas dos corpos de prova avaliados no 1º experimento.

Tratamento	Dimensões (cm)	Volume (cm^3)	Massa (g)	Densidade (kg/m^3)
Folha de Bananeira	3,7 x 3,8 x 3,8	53,43	13,49	254,35
Casca de Café	4,2 x 3,8 x 2,5	39,9	7,61	190,72
Folha de Bananeira + Casca de Café	3,5 x 3,5 x 3,5	42,87	8,68	202,47

As densidades medidas no segundo experimento foram mais baixas em relação ao primeiro experimento (Tabela 2), com médias respectivas de $163,36 \text{ kg/m}^3$; $137,81 \text{ kg/m}^3$ e $130,15 \text{ kg/m}^3$ para os tratamentos CA, CB e BA. Essa relação de densidades ficou dentro do esperado para estes resíduos, visto que a folha de bananeira é mais leve que a casca de café. A representação da correlação da densidade com os tratamentos, do segundo experimento, podem ser observadas pela Figura 9.

Figura 9 - Gráfico correlacionando a densidade (eixo y) com os tratamentos (eixo x) do segundo experimento.



Estes resultados são semelhantes aos descritos por Alemu, Tafesse e Deressa (2022), em que os pesquisadores realizaram um estudo utilizando *Pleurotus ostreatus* e suplementação para crescimento micelial, em três resíduos agroindustriais: casca de café, bagaço de cana e serragem. O tratamento com casca de café apresentou a menor densidade ($292,35 \text{ kg/m}^3$) em contraste com o bagaço de cana e a serragem ($310,92$ e $334,11 \text{ kg/m}^3$, respectivamente).

No trabalho de Holt *et al.* (2012), os autores descreveram resultados similares. Na pesquisa em questão foram realizados testes utilizando inóculos líquido e sólido de *Ganoderma lucidum*, que apresenta características semelhantes ao *P. ostreatus* (Bautista-Zamudio *et al.*, 2023), em seis substratos contendo carpelos e cascas de semente de algodão, amido e gesso. As densidades encontradas entre os doze tratamentos realizados variaram de 66.5 kg/m^3 a 224 kg/m^3 , visto que os tratamentos em que foi utilizado inóculo sólido apresentaram densidade maior quando comparados aos tratamentos com inóculo líquido.

Para além das semelhanças com os estudos descritos, os resultados aqui encontrados para densidade estão dentro do esperado de acordo com o trabalho de Yang *et al.* (2017), em que os pesquisadores realizaram testes utilizando biomateriais feitos com um fungo da podridão branca endêmico do Alasca e uma mistura de serragem, grãos de painço, farelo de trigo, sulfato de cálcio e fibras orgânicas. Os autores realizaram 35 tratamentos ao todo, utilizando diferentes protocolos para mistura dos substratos, com níveis diferentes de compactação e em diferentes tempos de crescimento para o fungo. Em amostras secas, com tempo de crescimento de duas

semanas, foram relatadas densidades entre 240-265 kg/m^3 (compactas) e 165-195 kg/m^3 (soltas), enquanto a densidade das amostras com seis semanas de crescimento foi de 230-280 kg/m^3 e 160-280 kg/m^3 , respectivamente. Estes resultados corroboram com os achados desta pesquisa, que variaram entre 130-254 kg/m^3 .

Contudo, embora a concordância com a literatura ser evidente, devemos comparar também com produtos de poliestireno expandido, já que são a forma de plástico que mais se assemelha ao produto em desenvolvimento. Os dados disponibilizados colocam a densidade de EPS na faixa de 12-48 kg/m^3 (UNIVERSAL [...], 2025), que são valores comparativamente muito menores do que os resultados obtidos. Logo, apesar do biocompósito de micélio ser um material leve, sua densidade ainda está muito acima daquela desejada para produtos de EPS, que são considerados super leves de acordo com Öchsner (2024). Contudo, a maior densidade do biomaterial pode ser balanceada pelo baixo custo da sua matéria-prima, já que relacionado à leveza do material estão o custo, produtividade e rendimento.

Por fim, é importante enfatizar que as diferenças observadas entre o primeiro e segundo experimentos descritos neste estudo, apesar de estarem em conformidade com a literatura, revelam a complexidade no processo de desenvolvimento de biomateriais. Alguns fatores que podem explicar as discrepâncias encontradas são as diferenças nos protocolos de secagem, a influência da geometria das amostras no crescimento micelial e o crescimento dos corpos de frutificação que ocorreu no primeiro experimento, que pode ter desviado energia que antes seria atribuída para o desenvolvimento micelial. Essas variáveis podem afetar diretamente a densidade e outras propriedades mecânicas do material, o que se torna mais relevante ao analisar os resultados dos ensaios de compressão detalhados a seguir.

5.3 Características mecânicas

Os ensaios de compressão foram realizados a partir das amostras produzidas no segundo experimento. A observação de uniformidade entre resultados das amostras de cada tratamento é uma característica vantajosa para a produção em escala. Dado a natureza do material e as variáveis de temperatura, umidade e de nutrientes associadas ao crescimento de um organismo vivo era esperado que houvesse variações no comportamento do bioproduto.

A velocidade de carregamento adotada foi de 1,2 mm/s para CA1, seguido de 2,4 mm/s para CA2 e 3,6 mm/s para as demais repetições (CA3-CA7). A velocidade de carregamento não afetou o comportamento de deformação do tratamento CA, no qual foi observado que três das cinco amostras carregadas com maior velocidade mantiveram similares

os valores de resistências em comparação com as duas primeiras amostras submetidas a um carregamento mais lento. Dessa forma, a velocidade adotada para os demais testes foi de 3,6 mm/s e a deformação máxima estabelecida foi de 40 mm. A partir dos resultados, foi plotado uma curva de tensão (Pa) por deformação (Microstrain) (Figura 10), cujo comportamento seguiu uma tendência linear, com tensão média de compressão de 29,8 Pa. Após remoção da carga de carregamento, foi possível observar uma recuperação parcial de deformação, seguido de uma média da deformação permanente de aproximadamente 26 mm.

A partir das medidas de deformação, foi possível aferir o módulo de elasticidade (Tabela 3) para cada amostra (média de 78,4 Pa), que em suma atesta para a rigidez de um material de forma diretamente proporcional.

Figura 10 - Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x), das amostras de CA.

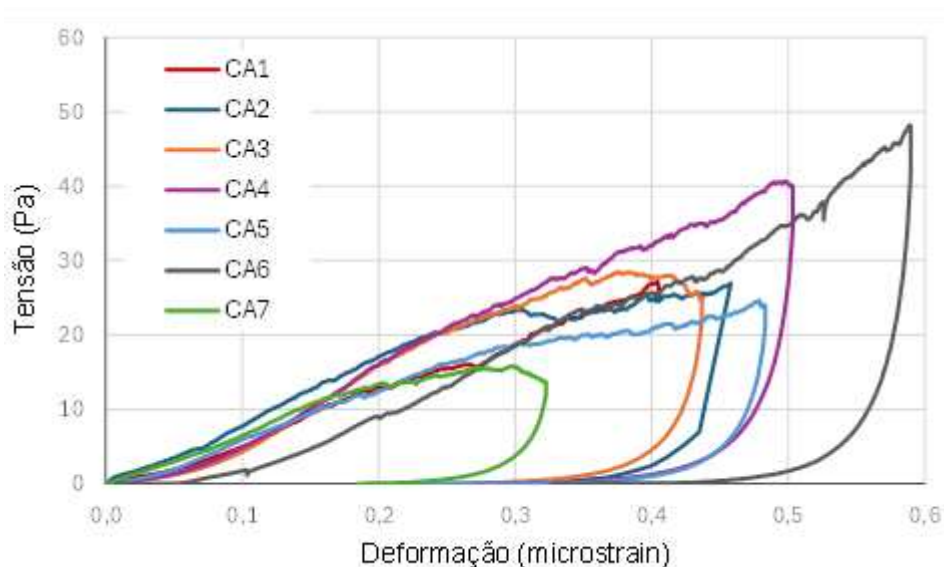


Tabela 3 - Velocidade de carregamento e valores máximos de força (P_{max}), deslocamento (δ_{max}), tensão (σ_{max}), módulo de elasticidade (E) e energia de deformação para as amostras no tratamento CA.

amostra	veloc (mm/minuto)	P_{max} (N)	δ_{max} (mm)	σ_{max} (Pa)	E (Pa)	energia de deform
CA1	1,2	29,60	35,30	27,1	66,8	5,08
CA2	2,4	28,60	29,10	23,4	90,6	9,05
CA3	3,6	30,94	37,67	28,5	90,2	7,34
CA4	3,6	46,42	40,86	40,7	77,3	10,73
CA5	3,6	29,30	40,90	24,6	68,5	7,04
CA6	3,6	57,00	45,80	48,2	84,2	11,70
CA7	3,6	18,50	28,00	15,80	71,20	3,36
média		34,34	36,80	29,76	78,40	7,76

D.P.	11,97	6,02	10,21	9,31	2,76
C.V.	34,9%	16,4%	34,3%	11,9%	35,5%

Para o tratamento de folha de bananeira a velocidade de carregamento adotada foi uniforme ($7,2 \text{ mm/s}$) e a deformação máxima foi de 60 mm. A velocidade adotada foi delimitada com base no comportamento das amostras com casca de café, em que a velocidade de carregamento não afetou significativamente a resistências dos corpos de prova. O comportamento da curva de tensão por deformação diferenciou-se do tratamento CA. A tensão aumentou de maneira gradual e mostrou um comportamento exponencial (Figura 11), indicando que o aumento da deformação também aumentou a rigidez da amostra. A curva é representada por um polinômio de quinto grau, ou seja, este comportamento indica que as amostras BA apresentaram módulo de elasticidade não linear e enrijeceram quando submetidos à carga de compressão elevada. A carga média de compressão visualizada para o tratamento BA foi de 166,3 Pa, consideravelmente maior do que o observado para as amostras de casca de café. Além disso, com a remoção da carga de carregamento, foi possível observar uma recuperação parcial de deformação, seguido de uma média da deformação permanente de aproximadamente 44 mm.

Também foi possível aferir o módulo de elasticidade para o tratamento BA (Tabela 4), com média de 64 Pa.

Figura 11 - Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x), das amostras de BA.

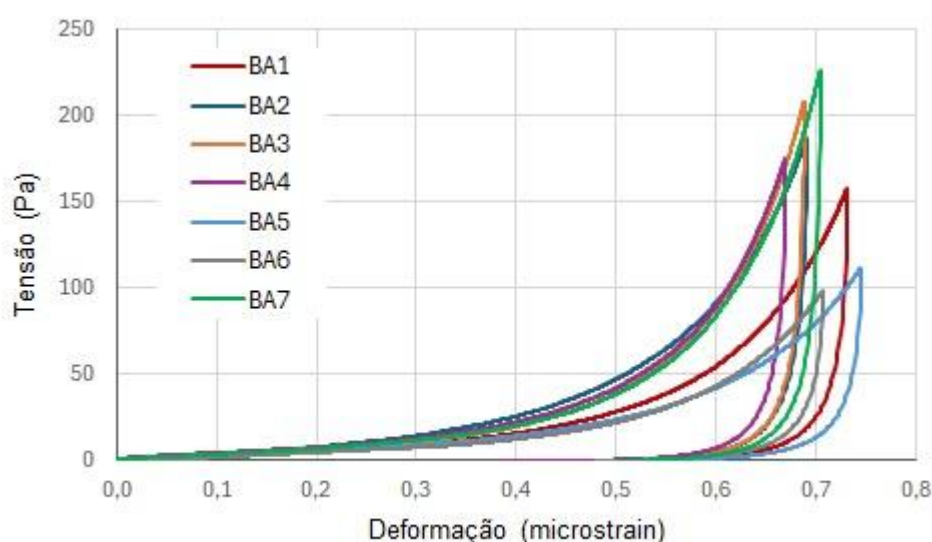


Tabela 4 - Velocidade de carregamento e valores máximos de força (P_{max}), deslocamento (δ_{max}), tensão (σ_{max}), módulo de elasticidade (E_{06}) e energia de deformação para as amostras no tratamento BA.

amostra	veloc (mm/minuto)	P_{max} (N)	δ_{max} (mm)	σ_{max} (Pa)	E_{06} (Pa)	energia de deform
BA1	7,2	174,80	59,90	158,3	10,5	23,97
BA2	7,2	209,30	60,10	186,5	91,7	28,68
BA3	7,2	232,90	59,90	207,5	88,1	26,66
BA4	7,2	191,40	59,90	175,1	88,8	24,34
BA5	7,2	108,40	59,80	111,4	41,9	19,59
BA6	7,2	107,00	60,10	99	43,2	15,84
BA7	7,2	247,10	59,90	226,10	84,00	29,66
média		181,56	59,94	166,27	64,03	24,11
D.P.		51,76	0,10	43,70	29,63	4,58
C.V.		28,5%	0,2%	26,3%	46,3%	19,0%

Por meio do gráfico de tensão por deformação, para as amostras CB, foi possível observar um comportamento semelhante às amostras feitas apenas com folha de bananeira (BA), apresentando também um comportamento de um polinômio de quinto grau, com relação proporcional entre o grau de deformação e o enrijecimento das amostras. A tensão média para o tratamento CB foi de 268,3 Pa, maior do que o observado para as amostras com apenas casca de café (CA) ou apenas folha de bananeira (BA). Também, com a remoção da carga de carregamento, foi possível observar uma recuperação parcial de deformação, seguido de uma média da deformação permanente de aproximadamente 44 mm, sendo o valor idêntico ao observado para o tratamento BA, e maior que para o CA (26 mm).

Assim como para os outros tratamentos, foi medido o módulo de elasticidade de CB (Tabela 5), cujo valor médio foi de 87,6 Pa.

Figura 12 - Gráfico de tensão (eixo y) por deformação (eixo x), das amostras de CB.

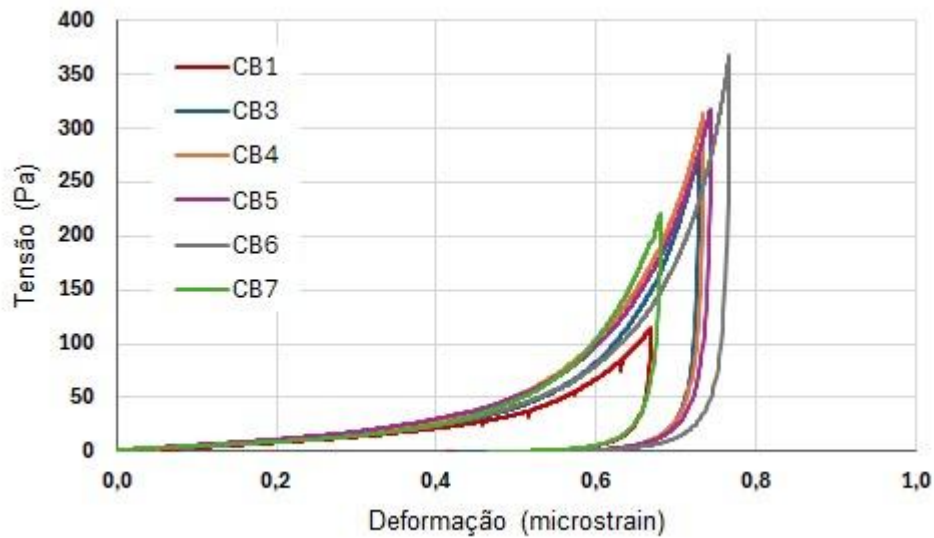


Tabela 5 - Velocidade de carregamento e valores máximos de força (***Pmax***), deslocamento (***δmax***), tensão (***σmax***), módulo de elasticidade (***E06***) e energia de deformação para as amostras no tratamento CB.

amostra	veloc mm/minuto	<i>Pmax</i> (N)	<i>δmax</i> (mm)	<i>σmax</i> (Pa)	<i>E06</i> (Pa)	energia de deform
CB1	7,2	146,60	58,10	114,3	65,2	18,78
CB2						
CB3	7,2	340,40	64,80	277,8	81,8	36,36
CB4	7,2	368,20	64,80	313,0	101,4	44,16
CB5	7,2	346,80	64,80	317,3	96,6	46,00
CB6	7,2	412,00	49,80	367,1	76,0	46,27
CB7	7,2	256,10	60,10	220,0	104,70	29,89
média		311,68	60,40	268,25	87,62	36,91
D.P.		87,23	5,41	81,95	14,34	10,01
C.V.		28,0%	9,0%	30,6%	16,4%	27,1%

Considerando os dados apresentados, podemos inferir que o composto misto (folha de bananeira + casca de café) foi o material mais resistente ($\sigma_{max} = 268,3$ Pa) e com maior rigidez média ($E06 = 87,6$ PA). Em contrapartida, o compósito com micélio e casca de café foi o menos resistente ($\sigma_{max} = 29,8$ Pa) e com rigidez mediana ($E = 78,4$). Adicionalmente, foi observado que o composto com micélio e folha de bananeira apresentou resistência intermediária à compressão ($\sigma_{max} = 166,3$ Pa) e a menor rigidez entre os três tratamentos ($E06 = 64$ Pa).

Comparativamente, no trabalho de Yang *et al.* (2017), foram observados resultados de tensão máxima na faixa de 350-570 kPa e módulo de elasticidade máximo de 60 MPa. Por outro lado, no trabalho de Holt *et al.* (2012), os autores registraram valores máximos de 72 kPa e 674

kPa, respectivamente para tensão de compressão e módulo de elasticidade. Assim como Ghazvinian e Gürsoy (2022b), que registraram valores de tensão máxima de 498 kPa e módulo de elasticidade de 6,1 Mpa. Além disso, os dados disponíveis para materiais de EPS estipulam que a força de compressão deva estar entre 35 kPa e 414 kPa (UNIVERSAL [...], 2025).

A performance das amostras neste trabalho foi bem menor do que as relatadas pela literatura quanto à resistência à tensão de compressão e ao módulo de elasticidade. Entretanto, a grande diferença entre as metodologias encontradas, como a diferença no tamanho dos corpos de prova, não permite uma comparação tão direta e, como já foi mostrado, reafirma que pequenas alterações na forma como esse material é cultivado podem ter impactos significativos em suas características. Vale ressaltar que, ainda não há consenso sobre o efeito que certas mudanças metodológicas, como o tamanho do substrato, e formas de cultivo têm sobre o material (Elsacker *et al.*, 2019; Islam *et al.*, 2018).

Contudo, a utilização de suplementação (nutrientes além do substrato lignocelulósico) para o crescimento micelial é um fator comum em outros trabalhos que pode explicar a melhor performance mecânica descrita, em comparação ao presente estudo. A utilização de resíduos agrícolas para desenvolvimento deste material surge como uma forma de baratear a produção de materiais mais sustentáveis de modo a popularizar seu uso. Neste contexto, a utilização de suplementação, na forma de farelos e outros aditivos que facilitam o crescimento do fungo, poderia encarecer a produção de compósitos miceliais e torná-los uma alternativa comercialmente inviável. Em resposta a este problema, Soh *et al.* (2021) sugerem e investigam a utilização de resíduos da indústria alimentícia na tentativa de suplementar o crescimento micelial, sem a utilização de outros produtos, como o trigo e a cevada, que são atualmente utilizados em outros setores, como alimentação humana. Os autores descrevem que houve melhor crescimento micelial para os fungos suplementados, logo, a utilização de suplementos ricos em carboidratos é pode ser um fator determinante na robustez micelial.

Desse modo, é possível perceber que há grande potencial para o material apresentado e que mais pesquisas devem ser feitas no sentido de facilitar a investigação de como diferentes propriedades afetam a estrutura física deste biomaterial, além de estabelecer uma padronização no método de desenvolvimento dos compósitos miceliais.

5.4 Colorimetria

As cores superficiais observadas nos blocos miceliais e nas amostras do segundo experimento exibiram um aspecto amarronzado, derivado do substrato escolhido, permeado

pela cor branca do micélio. Os dados gerados pelo teste colorimétrico (Tabela 6), indicam essas características, que são importantes aspectos estéticos do material.

Tabela 6 - Dados do ensaio colorimétrico a partir do primeiro experimento. (CB) Folha de bananeira + casca de café; (CA) Casca de café; (BA) Folha de bananeira. Luminosidade (*L); espectro do vermelho ao ver (*a); espectro do amarelo ao azul (*b); índice de brancura (Y branco); índice de escuro (Y preto).

	Tratamentos		
	BA	CA	CB
L*	48,71	31,72	35,07
a*	9,32	5,52	6,48
b*	20,82	10,76	11,58
Y Branco	17,36	6,96	8,54
Y Preto	8,68	3,43	13,71
Opacidade	50,00	49,28	160,64

A grande opacidade observada no tratamento CB pode ser um fator positivo para o emprego deste biomaterial no desenvolvimento de embalagens alimentícias, visto que essa característica auxilia na proteção contra os raios UV. Além disso, o índice de brancura mais elevado observado em BA provavelmente deriva de uma maior colonização micelial na região analisada em comparação com os cortes para os tratamentos CA e CB, apesar destes tratamentos apresentarem maior colonização pelo *P. ostretatus*.

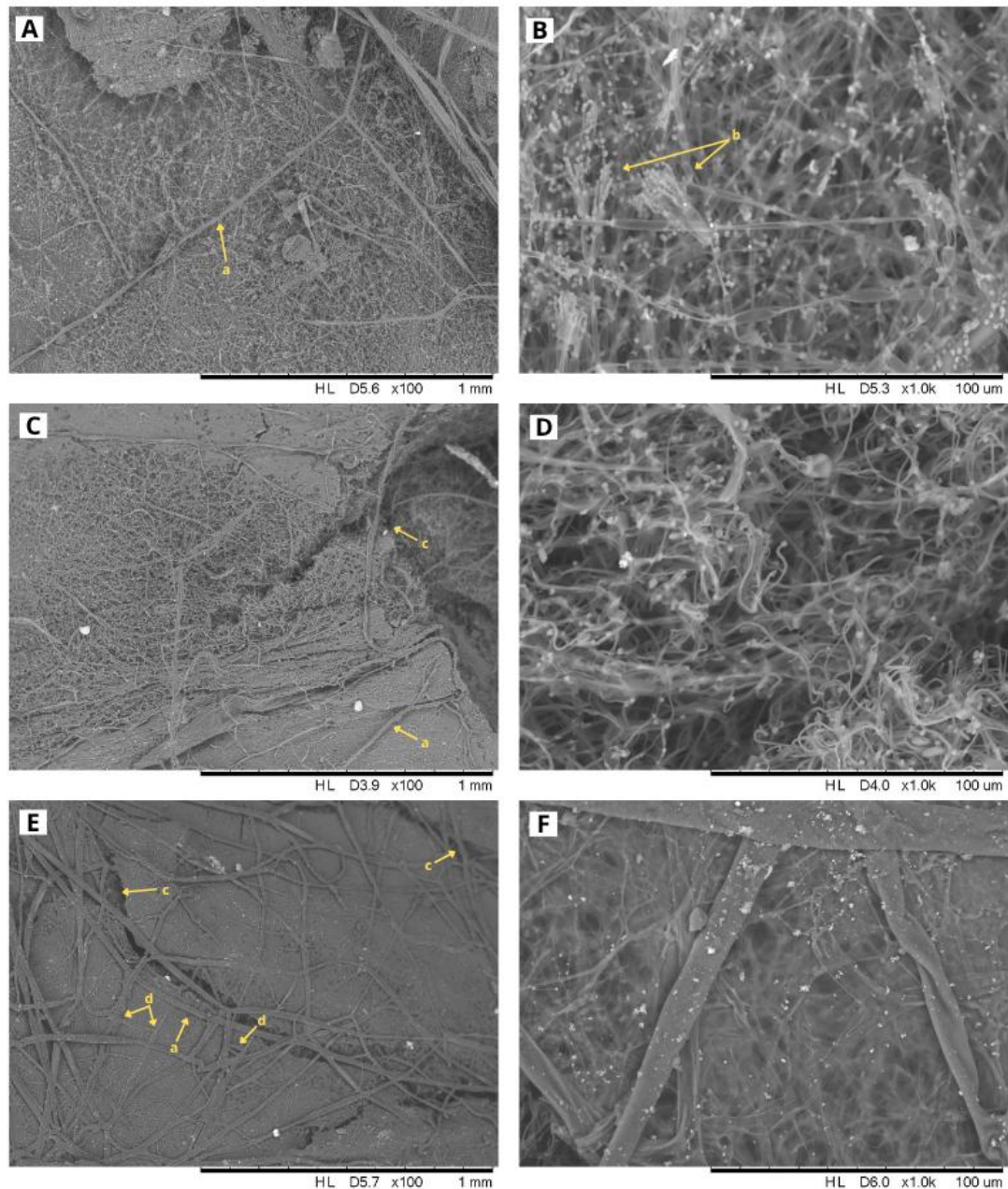
5.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura foram realizadas com o objetivo de caracterizar estruturalmente a superfície dos materiais. As imagens obtidas mostram hifas de *P. ostretatus*, interconectadas e agregadas aos resíduos agrícolas de BA, CA e CB visualizadas com aumento de 100 e 1000 vezes (Figura 13). Também foi possível observar (Figura 13B) estruturas reprodutivas de *Penicillium* sp. (seta amarela “b”), comumente encontrado como contaminante em blocos destinados para produção de cogumelos (Ghimire *et al.*, 2021).

Foi possível observar nos materiais uma superfície com várias irregularidades (seta amarela “c”) e a presença de hifas de *P. ostretatus* (seta amarela “a”) que atuaram como um agente cimentante, conectando o substrato e preenchendo alguns espaços que anteriormente não

estariam preenchidos com materiais sólidos. Também foi observado hifas em anastomose (seta amarela “d”), ou seja, após evento de fusão.

Figura 13 - Imagens de microscopia eletrônica de varredura do micélio de *P. ostreatus* em substratos de folha de bananeira (A e B), casca de café (C e D) e mistura de folha e casca (E e F).



As hifas mais grossas e mais organizadas observadas no sistema CB provavelmente influenciaram de forma positiva no desempenho mecânico do biomaterial, auxiliando na maior resistência e rigidez observada.

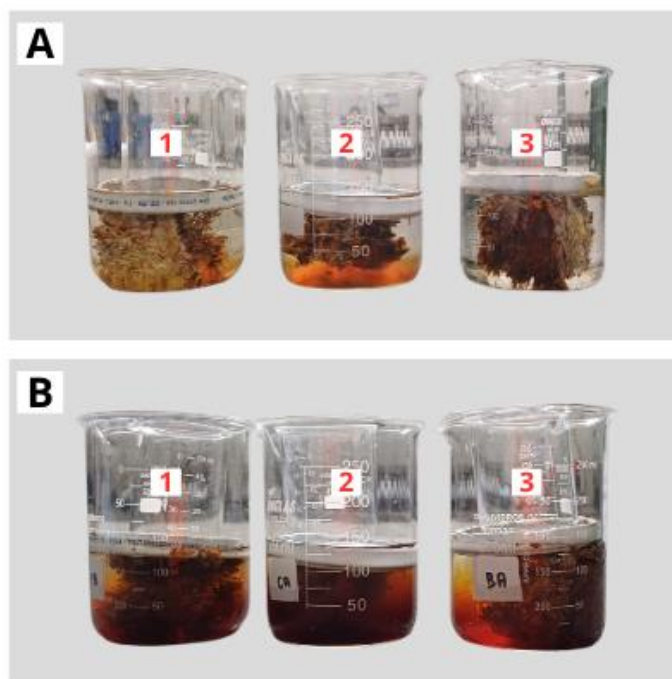
5.6 Índice de intumescimento (II)

O índice de intumescimento, que indica a capacidade de absorção de água de um material. Para essa variável, o tratamento CA apresentou o maior índice (45,44%), seguido de BA (40,27%) e CB (39,37%) (Tabela 7). Esses resultados indicam que a casca de café tem uma maior capacidade de absorção de água em comparação com a folha de bananeira e isso é indicativo da biodegradabilidade do material, já que a maior disponibilidade de água no sistema é propícia para a atividade de microrganismos decompositores.

Tabela 7 - Índice de intumescimento dos blocos de casca de café (CA), folha de bananeira (BA) e mistura de folha e casca (CB) colonizados com *P. ostreatus*.

Tratamento	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	SD
BA	13,486	22,5785	40,27%
CA	7,6119	13,9528	45,44%
CB	8,6800	14,3177	39,37%

Figura 14 – Amostras submersas em água dos substratos colonizados por *P. ostreatus* no tempo 0 (A), amostras submersas após 2 h (B). (1) Folha de bananeira + casca de café; (2) Casca de café; (3) Folha de bananeira.



Em trabalho de revisão feito por, Muiruri *et al.* (2023), foi mencionado o desenvolvimento de dois tipos de biocompósito micelial. O primeiro método envolveu a colonização primária de pedaços de madeira e, posteriormente, estes pedaços foram usados para inoculação de um substrato de madeira com nanofibras de celulose (CNF). No segundo método, o fungo, a madeira e as CNF foram misturadas diretamente para obtenção do biocompósito. Os autores observaram que o primeiro método resultou em uma diminuição de 40% na capacidade de absorção de água do material, em comparação ao segundo método utilizado. Em suma, a escolha do resíduo e da metodologia empregada interfere na absorção de água do biomaterial e há a possibilidade dessa característica ser afetada por outros fatores como a colonização prévia do substrato, assim como descrita por Muiruri *et al.* (2023).

Além disso, em um primeiro momento, a água na qual foram imersos os blocos contendo casca de café adquiriu um tom mais escuro e avermelhado, característico da matéria-prima. Após o tempo de submersão (2 h), foi observado a coloração da água em todos os béqueres (Figura 14). Isso indica que há a liberação de exsudatos que colore a água e cabe uma investigação posterior para averiguar a natureza destes compostos e se são derivados da decomposição do resíduo pelo fungo ou se são compostos naturalmente liberados após submersão da folha de bananeira e da casca de café na água.

6 CONCLUSÃO

Os materiais à base de micélio fúngico com resíduos orgânicos possuem características moldáveis e muitas variáveis atuam na constituição destes biomateriais. Neste estudo foi observado que a seleção dos resíduos foi importante pois influenciou o comportamento mecânico do bioproduto, bem como o comportamento de colonização micelial. Resíduos mais rígidos, como a casca de café atuam no enrijecendo o material, enquanto resíduos mais maleáveis, como a folha de bananeira, aumentam a capacidade de deformação do material. Portanto, o micélio de *P. ostreatus* foi agregou os resíduos orgânicos mantendo-os em formato definido, mesmo após certo grau de deformação, sendo ele um bom agente cimentante. Conclui-se que os biomateriais produzido a partir do micélio fúngico e resíduos agrícolas possui potencial para desenvolvimento e uso em novos produtos mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- ALEMU, Digafe; TAFESSE, Mesfin; DERESSA, Yohannes Gudetta. Production of Mycoblock from the Mycelium of the Fungus *Pleurotus ostreatus* for Use as Sustainable Construction Materials. **Advances In Materials Science And Engineering**, [S.L.], v. 2022, p. 1-12, 31 ago. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/2876643>.
- ALI, Maryam; IBRAHIM, Muhammad; AHMAD, Ishtiaq; SALEEM, Muhammad; MOHSINULLAH. Comparative Mycelium Growth of Five Mushroom Species on Potato Dextrose Agar: effects of inoculum dose and temperature. **Biology Bulletin Reviews**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 312-318, abr. 2025. Pleiades Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1134/s2079086424601248>.
- ATTIAS, Noam; DANAI, Ofer; ABITBOL, Tiffany; TARAZI, Ezri; EZOV, Nirit; PEREMAN, Idan; GROBMAN, Yasha J.. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: comparative review and experimental analysis. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 246, p. 119037, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037>.
- BAUTISTA-ZAMUDIO, Paula Andrea; FLÓREZ-RESTREPO, María Alejandra; LÓPEZ-LEGARDA, Xiomara; MONROY-GIRALDO, Leidy Carolina; SEGURA-SÁNCHEZ, Freimar. Biodegradation of plastics by white-rot fungi: a review. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 901, p. 165950, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165950>.
- CORDEIRO, Noéle Khristinne; CARDOSO, Kerolém Prícila Sousa; MATA, Tatiane Calandrino da; BARBOSA, Jaqueline de Araújo; GONÇALVES JUNIOR, Affonso Celso. GESTÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO FORMA DE REDUÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS. **Revista de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 23, 24 ago. 2020. Centro Universitario La Salle - UNILASALLE. <http://dx.doi.org/10.18316/rca.v14i2.5593>.
- ELSACKER, Elise; VANDELOOK, Simon; BRANCART, Joost; PEETERS, Eveline; LAET, Lars de. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. **Plos One**, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 1, 22 jul. 2019. Public Library of Science (PLOS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>.
- UNIVERSAL CONSTRUCTION FOAM - EPS Geofoam Data Sheet. [S.L.], Disponível em: <http://www.universalconstructionfoam.com/downloads/geofoam-eps-data-sheet.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- ESPITIA, Paula Judith Perez; SOARES, Nilda de Fátima Ferreira; TEÓFILO, Reinaldo F.; COIMBRA, Jane Sélia dos Reis; VITOR, Débora M.; BATISTA, Rejane Andrade; FERREIRA, Sukarno Olavo; ANDRADE, Nélío José de; MEDEIROS, Eber Antonio Alves.

Physical–mechanical and antimicrobial properties of nanocomposite films with pediocin and ZnO nanoparticles. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 94, n. 1, p. 199-208, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.01.003>.

GHAZVINIAN, Ali; GURSOY, Benay. BASICS OF BUILDING WITH MYCELIUM-BASED BIO-COMPOSITES. **Journal Of Green Building**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 37-69, 1 jan. 2022a. College Publishing. <http://dx.doi.org/10.3992/jgb.17.1.37>.

GHAZVINIAN, Ali; GÜRSOY, Benay. Mycelium-Based Composite Graded Materials: assessing the effects of time and substrate mixture on mechanical properties. **Biomimetics**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 48, 19 abr. 2022b. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics7020048>.

GHIMIRE, Ashish; PANDEY, Krishna Raj; JOSHI, Yagya Raj; SUBEDI, Sobita. Major Fungal Contaminants of Mushrooms and Their Management. **International Journal Of Applied Sciences And Biotechnology**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 80-93, 28 jun. 2021. Nepal Journals Online (JOL). <http://dx.doi.org/10.3126/ijasbt.v9i2.37513>.

HANEEF, Muhammad; CESERACCIU, Luca; CANALE, Claudio; BAYER, Ilker S.; HEREDIA-GUERRERO, José A.; ATHANASSIOU, Athanassia. Advanced Materials From Fungal Mycelium: fabrication and tuning of physical properties. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1, 24 jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/srep41292>

HOLT, G. A.; MCINTYRE, G.; FLAGG, D.; BAYER, E.; WANJURA, J. D.; PELLETIER, M. G.. Fungal Mycelium and Cotton Plant Materials in the Manufacture of Biodegradable Molded Packaging Material: evaluation study of select blends of cotton byproducts. **Journal Of Biobased Materials And Bioenergy**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 431-439, 1 ago. 2012. American Scientific Publishers. <http://dx.doi.org/10.1166/jbmb.2012.1241>.

Instituto Adolfo Lutz (1985). *Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1. Métodos químicos e físicos para análise de alimentos*, 3rd edn. São Paulo: IAL.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2012. Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_residuos_organicos.pdf> Acesso em: 13/06/2025

ISLAM, M. R.; TUDRYN, G.; BUCINELL, R.; SCHADLER, L.; PICU, R. C.. Mechanical behavior of mycelium-based particulate composites. **Journal Of Materials Science**, [S.L.], v. 53, n. 24, p. 16371-16382, 16 ago. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-018-2797-z>.

MODELLI, Laís. Como o plástico mudou a sociedade brasileira. **Deutsche Welle**. [S.L.], p. 1.

08 fev. 2019. Disponível em: <https://www.dw.com/pt-br/como-o-pl%C3%A1stico-mudou-a-sociedade-brasileira/a-47434076>. Acesso em: 21 jun. 2025.

LI, Jing; HAN, Li-Hong; LIU, Xiao-Bin; ZHAO, Zhi-Wei; YANG, Zhu L.. The saprotrophic *Pleurotus ostreatus* species complex: late eocene origin in east asia, multiple dispersal, and complex speciation. **Ima Fungus**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 1, 8 jun. 2020. Pensoft Publishers. <http://dx.doi.org/10.1186/s43008-020-00031-1>.

LUZ, Mário Sérgio da; BORGES, Maria Flávia; CAMPOS, Ariana de; FERREIRA, Deusmaque Carneiro; ROCHA, Vinícius Carvalho; GONÇALVES, Júlio Cesar Souza Inácio; LEMOS, Diego Andrade; POLETO, Cristiano. Reciclagem de Poliestireno Expandido (EPS) Recycling: um processo ambientalmente favorável para a recuperação do poliestireno (ps) usando óleo de soja residual. **Holos**, [S.L.], v. 5, n. 39, p. 1, 18 dez. 2023. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2023.16351>.

MENOLLI, Nelson; TRIERVEILER-PEREIRA, Larissa; ZIED, Diego C.; PEREIRA, Fillipe de O.; SULZBACHER, Marcelo A.; DRECHSLER-SANTOS, Elisandro R.; COSTA-REZENDE, Diogo H.; WERNER, Daniela; CALAÇA, Franciso J. Simões; ZABIN, Denis A.. Cogumelos comestíveis no Brasil: estado atual do conhecimento, avanços e perspectivas. **Lilloa**, [S.L.], p. 103-161, 30 maio 2025. Fundacion Miguel Lillo. <http://dx.doi.org/10.30550/j.lil/1879>.

MUIRURI, Joseph Kinyanjui; YEO, Jayven Chee Chuan; ZHU, Qiang; YE, Enyi; LOH, Xian Jun; LI, Zibiao. Sustainable Mycelium-Bound Biocomposites: design strategies, materials properties, and emerging applications. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, [S.L.], v. 11, n. 18, p. 6801-6821, 26 abr. 2023. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00831>.

Nações Unidas no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

ÖCHSNER, Andreas. On the Lightweight Characterization of Materials and Structures. In: ÖCHSNER, Andreas. **Collaborative Research Advancing Engineering Solutions for Real-World Challenges**. Sl: Springer, 2024. Cap. 1. p. 1-34. Disponível em: https://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-48521-3_1.

PETKOSKA, Anka Trajkovska; DANILOSKI, Davor; D'CUNHA, Nathan M.; NAUMOVSKI, Nenad; BROACH, Anita T.. Edible packaging: sustainable solutions and novel trends in food packaging. **Food Research International**, [S.L.], v. 140, p. 109981, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109981>.

Plastics Europe - The Fast Facts 2023/2024

PRASITTISOPIN, Lapyote; TERMKHAJORNKIT, Pipat; KIM, Young Hoon. Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): performance and environmental aspects. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 366, p. 132919, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132919>.

RIBEIRO, João Júlio Oliveira. Characterization of mushrooms of *Pleurotus ostreatus* and *Lentinula edodes* produced in agro-industrial wastes. 2009. 5 f. Tese (Doutorado em Associações micorrízicas; Bactérias lácticas e probióticos; Biologia molecular de fungos de interesse) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

ROSINA, Claudia Renata; BARONI, Silmara; CAVALCANTI, Osvaldo Albuquerque. Avaliação das propriedades de intumescimento e permeabilidade de filmes isolados de polimetacrilato contendo polissacarídeo da raiz de Lótus (*Nelumbo nucifera*). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 40, n. 3, p. 1-20, set. 2004. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-93322004000300020>.

SETHUPATHY, Sivasamy; MORALES, Gabriel Murillo; GAO, Lu; WANG, Hongliang; YANG, Bin; JIANG, Jianxiong; SUN, Jianzhong; ZHU, Daochen. Lignin valorization: status, challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 347, p. 126696, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126696>.

SILVA, Marliane de Cássia Soares da; LUZ, José Maria Rodrigues da; PAIVA, Ana Paula S.; MENDES, Daniele Ruela; CARVALHO, Alexandrina A. C.; NAOZUKA, Juliana; KASUYA, Maria Catarina Megumi. Growth and Tolerance of *Pleurotus ostreatus* at Different Selenium Forms. **Journal Of Agricultural Science**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 151, 15 jan. 2019. Canadian Center of Science and Education. <http://dx.doi.org/10.5539/jas.v11n2p151>.

SILVEIRA, V. D. **Micologia** Rio De Janeiro: Âmbito Cultural, 1995.

SOH, Eugene; SAEIDI, Nazanin; JAVADIAN, Alireza; HEBEL, Dirk E.; FERRAND, Hortense Le. Effect of common foods as supplements for the mycelium growth of *Ganoderma lucidum* and *Pleurotus ostreatus* on solid substrates. **Plos One**, [S.L.], v. 16, n. 11, p. 1, 30 nov. 2021. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0260170>.

SOUZA, Diene France de; SILVA, Marliane de Cássia Soares da; SOUZA, Tainara Camila de; ROCHA, Gabriel Cipriano; KASUYA, Maria Catarina Megumi; ELLER, Monique Renon. Effect of Selenium-Enriched Substrate on the Chemical Composition, Mineral Bioavailability, and Yield of Edible Mushrooms. **Biological Trace Element Research**, [S.L.], v. 201, n. 6, p. 3077-3087, 23 ago. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12011-022-03396-z>.

The Fraud of Plastics Recycling - Center for Climate Integrity 2024

VANDELOOK, Simon; ELSACKER, Elise; VAN WYLUCK, Aurélie; LAET, Lars de; PEETERS, Eveline. Current state and future prospects of pure mycelium materials. **Fungal Biology And Biotechnology**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 1, dez. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s40694-021-00128-1>.

VOBĚRKOVÁ, Stanislava; SOLČÁNY, Veronika; VRĚANSKÁ, Martina; ADAM, Vojtěch. Immobilization of ligninolytic enzymes from white-rot fungi in cross-linked aggregates. **Chemosphere**, [S.L.], v. 202, p. 694-707, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.088>.

WEI, Ren; ZIMMERMANN, Wolfgang. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?. **Microbial Biotechnology**, [S.L.], v. 10, n. 6, p. 1308-1322, 28 mar. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1751-7915.12710>.

YANG, Libin; PARK, Daekwon; QIN, Zhao. Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite: a review. **Frontiers In Materials**, [S.L.], v. 8, p. 1, 30 set. 2021. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmats.2021.737377>.

YANG, Zhaohui (Joey); ZHANG, Feng; STILL, Benjamin; WHITE, Maria; AMSTISLAVSKI, Philippe. Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 29, n. 7, p. 1, jul. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001866](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001866).