

UFRRJ

INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOSSANIDADE E
BIOTECNOLOGIA APLICADA**

DISSERTAÇÃO

**UTILIZAÇÃO DE MICÉLIO PARA PRODUÇÃO DE
BIOMATERIAL**

NAYHUME JESUS DOS SANTOS

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO DE
CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOSSANIDADE E BIOTECNOLOGIA
APLICADA**

**UTILIZAÇÃO DE MICÉLIO PARA PRODUÇÃO DE
BIOMATERIAL**

NAYHUME JESUS DOS SANTOS

Sob Orientação do Professor
Ricardo Luis Louro Berbara

e Coorientação do Professor
Anderson Claiton Ferrari

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre(a), no Curso de Pós-Graduação em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada, Área de Concentração em Biotecnologia aplicada.

Seropédica, RJ
Dezembro de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO DE
CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOSSANIDADE E BIOTECNOLOGIA
APLICADA

NAYHUME JESUS DOS SANTOS

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada**, no Curso de Pós-Graduação em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada, área de concentração em Biotecnologia Aplicada.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 12/12/2025

Documento assinado digitalmente
 RICARDO LUIZ LOURO BERBARA
Data: 02/06/2026 10:31:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ricardo Luis Louro Berbara, (Dr.,) UFRRJ
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 ORLANDO CARLOS HUERTAS TAVARES
Data: 09/06/2026 10:39:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orlando Carlos Huertas Tavares, (Dr.,) UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 SAEL SANCHEZ ELIAS
Data: 17/06/2026 11:00:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Sael Sánchez Elías, (Dr.,) UFRRJ

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237u Santos, Nayhume Jesus dos , 1997-
Utilização de micélio para produção de biomaterial /
Nayhume Jesus dos Santos. - Seropédica, 2025.
62 f.

Orientador: Ricardo Luis Louro Berbara.
Coorientador: Anderson Claiton Ferrari.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós Graduação em
Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada, 2025.

1. Biocompósitos. 2. Micélio. 3. Substrato. I.
Louro Berbara, Ricardo Luis , 1983-, orient. II.
Claiton Ferrari, Anderson, 1987-, coorient. III
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós Graduação em Fitossanidade e
Biotecnologia Aplicada. IV. Título.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, saúde e paciência concedidas ao longo de toda esta jornada acadêmica.

À minha família, minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo e pela compreensão nos momentos de ausência. Cada etapa desta dissertação só foi possível graças ao amor, paciência e confiança que sempre me dedicaram.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Agradeço aos meus orientadores e professores Ricardo Luis Louro Berbara, Anderson Claiton Ferrari, Sael Sachel Elias pela orientação, ensinamentos, dedicação e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca e colaboradores Orlando Tavares e Wellington Mary.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada, gratidão pela formação e ensinamentos ao longo do curso.

Aos colegas de laboratório, pesquisa e de trabalho, que compartilharam conhecimento, esforço e companheirismo durante toda trajetória.

Aos amigos que estiveram presentes durante todo o processo, agradeço o apoio emocional, palavras de motivação e os momentos de descontração que tornaram esta caminhada mais leve.

Por fim, agradeço a todas as pessoas e instituições que contribuíram para a realização desta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Os biomateriais miceliais têm emergido como alternativa sustentável para substituição de polímeros sintéticos e compósitos convencionais, devido à sua biodegradabilidade, baixo custo de produção e capacidade de adaptação morfológica. No presente estudo, foram desenvolvidos e caracterizados biomateriais obtidos a partir do crescimento controlado dos fungos *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus* em substratos lignocelulósicos, com ênfase na avaliação de suas propriedades mecânicas através de ensaios de Análise do Perfil de Textura (TPA). Os resultados demonstraram as diferenças entre as espécies. O biomaterial produzido por *G. lucidum* apresentou maior uniformidade mecânica, com e baixa variabilidade entre amostras, revelando comportamento rígido e frágil, com reduzida capacidade de recuperação após deformação. Em contraste, *P. ostreatus* exibiu maior força máxima pontual e maior capacidade de dissipação de energia, embora com maior variação estrutural, indicando uma matriz micelial mais flexível e parcialmente resiliente. Tais diferenças decorrem da organização das hifas de cada espécie, influenciando diretamente as propriedades mecânicas do compósito final. Os resultados reforçam o potencial dos biomateriais miceliais como opções ecológicas em aplicações estruturais e de embalagens, destacando a importância da escolha da espécie fúngica para modular o desempenho físico e funcional do material final.

Abstract

Mycelial biomaterials have emerged as a sustainable alternative to replace synthetic polymers and conventional composites due to their biodegradability, low production cost, and morphological adaptability. In this dissertation, biomaterials obtained from the controlled growth of the fungi *Ganoderma lucidum* and *Pleurotus ostreatus* on lignocellulosic substrates were developed and characterized, with emphasis on evaluating their mechanical properties through Texture Profile Analysis (TPA) tests. The results demonstrated the differences between the species. The biomaterial produced by *G. lucidum* showed greater mechanical uniformity, with low variability between samples, revealing rigid and brittle behavior, with reduced recovery capacity after deformation. In contrast, *P. ostreatus* exhibited greater maximum point strength and greater energy dissipation capacity, although with greater structural variation, indicating a more flexible and partially resilient mycelial matrix. These differences result from the intrinsic hyphal organization of each species, directly influencing the density, porosity, and mechanical properties of the final composite. The results reinforce the potential of mycelial biomaterials as ecological substitutes in structural and packaging applications, highlighting the importance of choosing the fungal species to modulate the physical and functional performance of the final material.

Sumário

1. Introdução.....	9
2. Revisão de Literatura	11
2.1. Características Gerais dos Fungos	11
2.2. <i>Ganoderma lucidum</i>	12
2.3. <i>Pleurotus ostreatus</i>	13
2.4. <i>Panus strigellus</i>	15
2.5. Materiais Convencionais	16
2.6. Tendências e Impacto Advindo da Indústria de Construção	16
2.7. Biomaterias à base de micélio	17
2.8. Produção Científica Associada a Produção de Compósitos Ligados à Micélio	18
2.9. Técnicas Para Obtenção de Biomateriais à Base de Micélios	22
2.10. Principais Características dos Biomateriais à Base de Micélios	23
3. Objetivos	25
3.1. Objetivo geral	25
3.2. Objetivos específicos	25
4. Material e Métodos	26
4.1. Metodologia de cultivo de biomateriais	26
4.2. Delineamento Experimental	30
4.3. Caracterização do biomaterial	31
4.4. Avaliação da resistência mecânica do biomaterial por teste de compressão.	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1. Ajustes no Processo de Desenvolvimento do Biomaterial Micelial	34
5.2. Aspectos ecológicos: Avaliação da Combinação Fungo-Substrato e Crescimento Micelial	37
5.3. Capacidade de Reproduzir Formatos	42
5.4. Atributos físicos	43
5.5. Comparação entre biomateriais miceliais e materiais convencionais	51
5.6. Biomaterial obtido	52
6. CONCLUSÃO.....	54
7. REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

A grande quantidade de materiais, especialmente plásticos e outros resíduos não biodegradáveis, utilizados e descartados diariamente, vem gerando sérios problemas ambientais. (DALBERG ADVISORS, 2019). Esses materiais podem levar centenas ou até milhares de anos para se decompor e, durante esse tempo, podem desenvolver uma cadeia com diversos problemas, como o acúmulo no ambiente, consequentemente a contaminação do solo e da água, além da dificuldade de degradação (SANTOS, 2021). A necessidade de mitigar a geração de poluentes na produção de materiais de construção impulsionou a busca pelo desenvolvimento de materiais ecoeficientes e sustentáveis. Essa iniciativa visa estabelecer uma relação menos prejudicial entre os processos produtivos e as condições indispensáveis ao equilíbrio de nossos ecossistemas.

Nesse contexto, a criação de materiais que minimizem os impactos ambientais tornou-se uma prioridade, o desenvolvimento de estruturas e materiais mais sustentáveis associado à gestão de resíduos, são essenciais para enfrentar esses desafios. Biomateriais à base de fungos é a tecnologia recentemente implementada, que visa a fabricação de artefatos majoritariamente de micélio, emerge como uma alternativa promissora e sustentável (Olivetti e Cullen, 2018).

O micélio é composto por uma rede de hifas que se desenvolvem sobre substratos orgânicos, como serragem, palha, resíduos agrícolas e outros materiais lignocelulósicos (Fricker et al., 2007). Durante o crescimento, o micélio infiltra-se e liga as partículas do substrato, formando uma estrutura sólida e coesa (Jones et al., 2017). Essa capacidade de auto-organização resulta em materiais com propriedades mecânicas ajustáveis, dependendo do tipo de fungo utilizado, do substrato e das condições de cultivo. Devido a capacidade de se alimentar de matéria orgânica este organismo coloniza o substrato onde está inserido através da formação de uma rede de micélios que envolve os compostos presentes (Bayer et al., 2008), e essa rede ocupa os espaços vazios do substrato. O micélio é a rede de filamentos microscópicos que compõe o corpo vegetativo dos fungos e desempenha papel crucial na decomposição da matéria orgânica. Os fungos possuem estrutura naturalmente robusta e podem ser cultivados em diversas formas e tamanhos, o que os torna altamente versáteis para a confecção de materiais inovadores e potenciais para desenvolver produtos como embalagens (Holt et al., 2012; Ziegler et al., 2016).

Ao utilizar o material resultante da completa degradação do substrato se tem um material puro de fungos (ou micélio), e, através da utilização de técnicas como secagem e aquecimento é possível paralisar a colonização, fazendo com que o organismo seja inativado, o que dará origem a um produto com determinadas características físicas que dependerão do tipo de fungo, da natureza do substrato e das condições em que está se desenvolvendo e do manejo do material após a colonização e inativação do organismo (Jones et al., 2017) .

Resíduos como casca de café, palha de trigo, arroz e milho, bagaço e palha de cana-de-açúcar, madeira e capim, são materiais orgânicos de produção renovável com grande conteúdo de carbono e nutrientes (Jiang et al., 2017; Appels et al., 2019; Girometta et al., 2019). O grupo específico de macrofungos/cogumelos ou grande grupo Agaricomycetes que mediante transformações quando tratado, junto a resíduos ricos em carbono, o micélio resulta em um material biodegradável. Ao fim de seu uso, pode se decompor e ficar disponível como recurso para desenvolvimento de outros organismos no ambiente. A produção de biomateriais a partir de micélio para aplicação em materiais de construção requer análise de suas propriedades de forma específica de acordo com substrato e espécie utilizados (Hasanin et al. 2018; Tacer-Caba et al. 2020).

A proposta inicial deste estudo consistiu na produção de um biomaterial à base de micélio fúngico com aplicação potencial na área da construção civil, visando o desenvolvimento de um material ecologicamente sustentável e com propriedades físico-mecânicas semelhantes às de materiais convencionais de construção, como blocos ou tijolos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Características Gerais dos Fungos

Os fungos são organismos eucariotos e heterotróficos, necessitando assim de fontes orgânicas externas para sua nutrição. São representantes do Reino Fungi, possuindo estruturas vegetativas que se caracterizam tanto por ser filamentosa ou unicelular, dependendo do organismo. A composição de sua parede celular é basicamente quitina, quitosana e uma mistura de polissacarídeos, sendo produtores de esporos sexuais e assexuais (Raghukumar, 2017). Com relação ao estilo de vida apresentado pelos fungos, estes podem ser saprófitas, parasitas, simbióticos, ou ainda saproparasitas. Dermek

(1984), descreve que o papel mais importante dos fungos na natureza é a decomposição, a quebra e de restos de plantas e animais mortos. Junto com bactérias, eles quebram a matéria orgânica em materiais mais simples para reutilização dos mesmos. Os órgãos vegetativos dos fungos são uma organização complexa denominada micélio, que é constituída de uma rede de hifas que se estendem a partir da ponta apical, de uma fonte de inóculo, e se interligam (Singh et al., 2025). Os fungos podem se apresentar de três formas: leveduras unicelulares, fungos filamentosos e forma semelhante a levedura, possuindo uma grande variedade de gêneros e espécies que possuem importância econômica e social, com diversas aplicações nas áreas de saúde, agricultura e alimentar (Samanta, 2015). O micélio constitui a parte vegetativa dos fungos, ou seja, é a "raiz" do fungo, embora o termo seja apenas uma analogia, já que não é uma raiz verdadeira. Ele é composto por uma rede de filamentos finos e ramificados chamados hifas, que se espalham por substratos como solo, madeira, folhas em decomposição ou resíduos orgânicos. Essa estrutura filamentosa atua como o sistema de crescimento e exploração do fungo, desenvolvendo-se no interior de substratos orgânicos sob condições ambientais controladas, especialmente em relação à umidade, temperatura e disponibilidade de oxigênio (Elsacker et al., 2019; Haneef et al., 2017). As hifas, unidades básicas do micélio, ramificam-se extensivamente no solo ou em outros meios orgânicos, formando um tecido fúngico altamente eficiente na absorção de nutrientes. Além de sua função trófica, o micélio desempenha um papel ecológico fundamental, ao estabelecer interações simbióticas com raízes de plantas, conhecidas como micorrizas, facilitando a troca de nutrientes minerais por compostos orgânicos. Esse processo não apenas promove o crescimento vegetal, mas também viabiliza a comunicação bioquímica entre diferentes organismos do ecossistema, contribuindo para a estabilidade e a resiliência ambiental (Sánchez, 2009).

2.2. *Ganoderma lucidum*

Ganoderma lucidum é um fungo filamentoso cuja espécie pertence ao reino Fungi, filo Basidiomycota, classe Agaricomycetes, ordem Polyporales e família Ganodermataceae (Sarkar et al., 2025). Atualmente 181 espécies de *Ganoderma* são relatados por todo o mundo, encontrado em todos os continentes, sendo um dos gêneros com maior contribuição de espécies dentro da família Ganodermataceae (Costa-Rezende et al., 2020). Dentre as características morfológicas utilizadas para identificação desses fungos o seu píleo lacado, variando entre vermelho e marrom-avermelhado, é um dos

principais atributos utilizados. Em sua forma selvagem, dependendo do seu habitat, pode haver variação em suas características morfológicas, também sendo característico: basidiocarpos com formato estipitados ou sésseis, imbricadas e não imbricadas. Nas espécies de *Ganoderma lucidum*, o cogumelo apresenta variações de tamanho que podem alcançar até 23 cm, numa estrutura reniforme brilhosa, que lembra um verniz, produzindo esporocarpos que variam entre as tonalidades de amarelo, alaranjado, vermelho a tons mais escuros próximos ao preto (Díaz e Díaz-Godínez, 2022; Thakur et al., 2024). Devido à dificuldade e confusão de outras espécies com *G. lucidum*, técnicas de biologia molecular têm sido utilizadas para sua identificação adequada, usando DNA *barcoding* e análise filogenética molecular com genes como rDNA ITS (Thakur et al., 2024). Em condições laboratoriais de cultivo, o micélio em meio de cultura BDA (Batata Dextrose-Ágar) apresenta inicialmente micélio esbranquiçado (Figura 1), tornando-se marrom escuro com aspecto algodinoso à medida que envelhece, podendo haver variações de cor entre oliva e bege (Thakur et al., 2024).

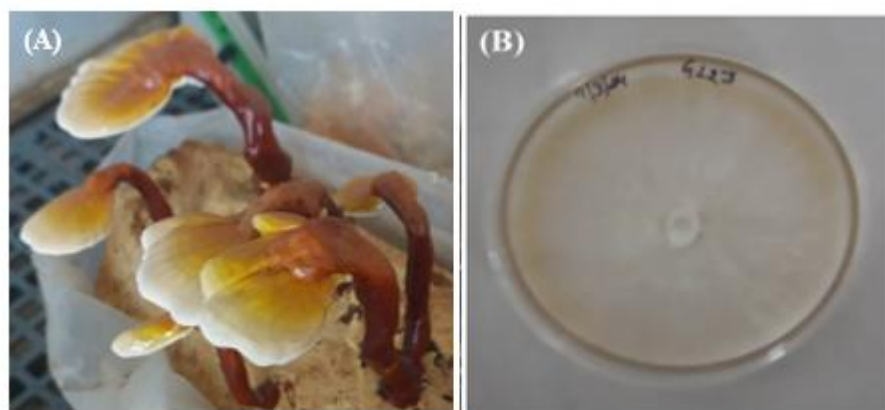


Figura 1: *Ganoderma lucidum* em sua forma selvagem (A) e cultivado em meio de cultivo BDA (B) (Fonte: Grupo Rural Fungi - UFRRJ).

Os fungos filamentosos possuem um importante papel econômico e social, sendo amplamente explorados na medicina, na alimentação, em cosméticos e como material alternativo para materiais (Thakur et al., 2024). Muito conhecido na Ásia pelas suas propriedades medicinais, *G. lucidum* é conhecido pelos seus compostos biologicamente ativos que possuem ação antioxidante, antidiabética, antineurodegenerativa, além de auxiliar na imunidade (Seweryn et al., 2021). Outros estudos apontam outras características, como a sua ação sobre o envelhecimento, estando relacionado ao seu

retardamento, além de potencial atividade anticancerígena de diferentes tipos (Santesso e Wieland, 2016; Wang et al., 2017). Junto de outros gêneros fúngicos, *G. lucidum* tem sido alvo de estudos para o desenvolvimento de materiais de construção alternativos, onde a partir do seu cultivo em substratos sólidos há o desenvolvimento vegetativo que, posteriormente sob tratamento adequado, se torna um material fibroso tendo como base a sua composição de micélios (Angelova et al., 2021).

2.3. *Pleurotus ostreatus*

Pleurotus ostreatus é uma das espécies comestíveis de cogumelos mais consumidas e populares no mundo, disseminado amplamente como componente em dietas alimentares, estando entre os três cogumelos mais cultivados no mundo (Wang et al., 2024). Pertencente ao filo Basidiomycota, classe Agaricomycetes, ordem Agaricales e família Pleurotaceae, esses cogumelos possuem corpo de frutificação com uma variação de cores que englobam diferentes tonalidades de branco, cinza, bege, amarelo, rosa e marrom, a depender de características como as espécies relatadas. Sua composição visível (Figura 2) se divide em píleo, mais comumente conhecido como o “chapéu” do cogumelo que suporta as demais estruturas fúngicas; estipe, que funciona como uma estrutura que conecta o píleo com o substrato em que o cogumelo está conectado e as lamelas (ou brânquias), localizadas abaixo do píleo, responsáveis pela produção de esporos (Kotadiya et al., 2021). Aliado à caracterização morfológica, análises moleculares são associadas para identificação e observação da diversidade genética dentro do gênero *Pleurotus*, a partir do sequenciamento de ITS, RPB2 e EF1 α para caracterização genética desses organismos (He et al., 2017).



Figura 2: *Pleurotus ostreatus* cultivado em meio de cultivo (A) e cultivado em bolsas tendo substrato. (B). (Fonte Nayhume Santos).

Conhecidos popularmente como “cogumelos ostra”, *Pleurotus sp.* são amplamente cultivados e comercializados no continente asiático. São cogumelos adaptados a diferentes condições de temperatura, faixas de pH e produtores de muitas enzimas de interesse comercial. Seu consumo é altamente empregado em diversas XX pelas suas propriedades químicas e nutricionais benéficas, além de estarem associados a atividades medicinais, que incluem: atividade antimicrobiana, antioxidante, antiviral, antitumoral, entre outros (Lesa et al., 2022). Atualmente há uma busca por aplicações biotecnológicas para esses fungos, buscando alternativas sustentáveis para solução de problemas. Devido à sua alta produção de enzimas líticas, eles são observados como potenciais organismos para decomposição de lignina e celulose (Cohen et al., 2002) e como componentes para biorremediação e biofermentação de resíduos de diversos setores, como o agrário, de modo a diminuir a presença de contaminantes e gerando subprodutos de interesse industrial (El-Ramady et al., 2022). Como uma alternativa sustentável como biomaterial, essa espécie fúngica é observada com potencial para esse uso devido à base de micélios que fornecem um material com boa estrutura para aplicação no setor industrial (Angelova et al., 2021).

2.4. *Panus strigellus*

O fungo *Panus strigellus* foi identificado inicialmente a partir do estado do Amazonas no Brasil, sendo uma espécie de cogumelos empregados na alimentação de povos nativos originários da região, onde foi relatado o seu consumo pela população Yanomami (Vargas-Isla et al., 2015). Pertencente ao filo Basidiomycota, classe Agaromycetes, ordem Polyporales e família Polyporaceae, esses cogumelos possuem características morfológicas que tornam a sua identificação em nível de gênero bem conhecida, tendo os corpos de frutificação em tons de roxo, marrom-avermelhado, chegando ao bege, de acordo com o estágio de desenvolvimento, associado a estruturas que se assemelham a pelos aderidas em seu píleo (Putra et al., 2023). O gênero *Panus* é conhecido pela produção de metabólitos secundários de interesse, e *P. strigellus* atualmente é estudado por possuir a capacidade de produzir novas biomoléculas ativas que estão sendo identificadas e exploradas quanto à caracterização de suas funções (Llanos-López et al., 2023). Diferente de outros fungos, que são predominantemente

termossensíveis, *P. strigellus* é capaz de suportar altas temperaturas e tendo como temperatura ótima para crescimento em condições laboratoriais entre 35°C e 40°C, quando cultivado em meio BDA (Figura 3), o que demonstra ser um fungo promissor devido a sua adaptação ao clima tropical (Corrêa-Santos et al., 2025).

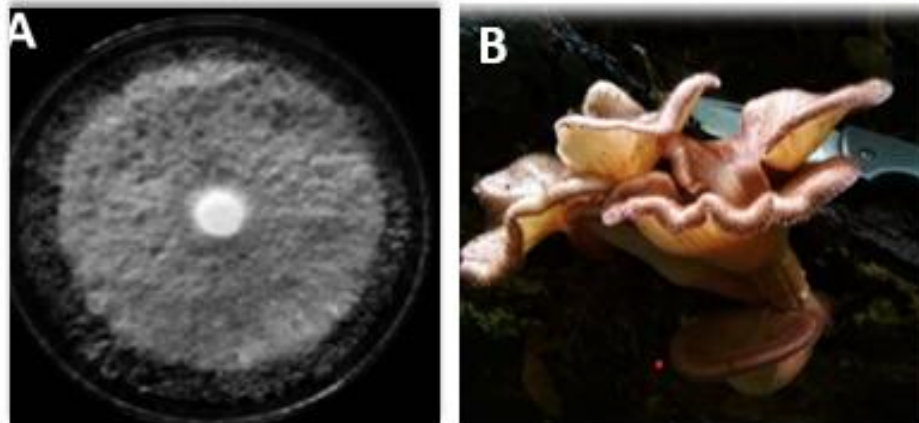


Figura 3: Morfologia de *Panus strigellus* cultivado em meio BDA (A) e sua forma selvagem de cogumelo se desenvolvendo sobre matéria orgânica em decomposição (B). (Fonte: Grupo Rural Fungi - UFRRJ)

2.5. Tendências e Impacto Advindo da Indústria de Construção

A grande tendência no aumento populacional nas cidades nos próximos anos, vem levando a um acréscimo considerável na busca por moradias e na produção de resíduos provenientes da produção e confecção de materiais de construção nas grandes metrópoles, com estimativas de uma geração de até 3,40 bilhões de toneladas de lixo até o ano de 2050. Associado a isso, o aumento das emissões de CO₂, que estão intimamente relacionados à indústria de construção civil, responsável por 75% dessas emissões quando se trata do setor de energia, evidenciando o impacto desse setor na crise climática (Singh et al., 2025). Tais questões são de extrema importância, tendo em vista que um direcionamento inadequado dos resíduos sólidos pode provocar uma série de efeitos negativos como: a poluição de recursos hídricos, do ar e solo, impactando na saúde humana, na biodiversidade vegetal, animal e microbiana e atuando na emissão de gases de efeito estufa. Além disso, a importância desses

tópicos se mostra inquestionável, visto que o crescimento populacional e a urbanização estão fortemente relacionados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS), principalmente no que diz respeito ao desenvolvimento de cidades mais resilientes e sustentáveis, propondo modelos de produção e itens de consumo que se relacionam com o setor de construção para as cidades (Voukkali et al., 2024). Desse modo o emprego de práticas, tendo como base a economia circular, se apresentam como um instrumento que pode diminuir os impactos advindos da geração de resíduos sólidos, que em sua maior parte não possuem um direcionamento adequado e sustentável (Tisserant et al., 2017) e, dentro disso, o desenvolvimento de materiais alternativos mais sustentáveis e economicamente viáveis são ferramentas de grande importância para a solução dessa problemática (Singh et al., 2025).

2.6. Materiais Convencionais

Os principais componentes tradicionalmente utilizados na construção são o concreto, aço e madeira. No continente europeu, 40% do consumo de energia e 50% da extração de materiais está associado ao setor de construção civil. A utilização de alvenaria na construção se tornou o principal material nos métodos de construção de edifícios devido aos baixos custos e facilidades associados ao seu uso (Syiemiong e Marthong, 2021). A madeira é principalmente utilizada como material estrutural, sendo um material utilizado em diversos cenários e com novas alternativas derivadas empregadas em seu desenvolvimento. Seu potencial de uso se dá pela sua leveza e resistência, podendo ser utilizada em construções pré-fabricadas (Wimmers, 2017). O uso do ferro na construção, em sua origem, mimetiza em muitos aspectos a função da madeira, adquirido um aspecto estrutural. Utilizando em sua composição diferentes metais, esse material possui boas características de resistência aliada ao baixo peso, possuindo muitas aplicações (Bakis et al., 2002). No passado, a utilização de materiais de construção era associada a materiais disponíveis no ambiente, proporcionando um menor prejuízo ambiental. Com a globalização, o uso massivo dos atualmente tradicionais materiais gerou grande impacto ambiental, devido à poluição e geração de energia na produção desses materiais, o que leva a esforços na busca de alternativas mais sustentáveis às encontradas na atualidade (Mukherjee et al., 2023).

2.7. Biomateriais à base de micélio

Compósitos à base de micélio (*Mycelium-based composites* - MBCs), consiste em materiais produzidos a partir de subprodutos lignocelulósicos associados ao micélio fúngico (Sydor et al., 2022). Uma alternativa mais sustentável aos materiais tradicionalmente utilizados principalmente na construção, arquitetura e indústria. Em relação aos principais componentes relacionados aos biomateriais, os fungos de podridão branca, apresentam um grande potencial para sua produção, devido a sua capacidade de quebrar moléculas complexas e formar uma biomassa lignocelulósica adequada para a confecção desses produtos (Singh et al., 2025). Dentre as espécies mais estudadas na produção de MBCs, os fungos *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus* são os mais empregados nesses estudos, comparados com outras espécies. Em relação aos substratos empregados, em sua maior parte são provenientes de resíduos industriais, subprodutos da produção agrícola e resíduos alimentícios, sendo comum o uso de serragens de madeira, palhada triturada de trigo, arroz ou milho, cascas, farelos, polpas e outros. (Sydor et al., 2022). A composição dos substratos é de grande importância para as propriedades físicas e químicas após a inoculação do fungo no substrato a ser utilizado.

O grupo dos microrganismos pertencentes ao filo Basidiomycota que são denominados de fungos de podridão branca, contemplam as espécies *Agrocybe aegerita*, *Coprinus comatus*, *Ganoderma lucidum*, *Ganoderma oregonense*, e *Pleurotus ostreatus*, componentes conhecidos pela sua capacidade de degradação de diversos materiais que possuem em sua composição celulose, hemicelulose e lignina, sendo altamente adaptáveis a condições ambientais e de cultivo, além da capacidade de se desenvolver sobre matéria orgânica em decomposição e sintetizar enzimas de interesse biotecnológico (Bari et al., 2020; Singh et al., 2025). Diferente de outros fungos que atingem mais superficialmente os tecidos vegetais, os fungos de podridão branca possuem um padrão de decomposição onde atuam de forma simultânea e seletiva sobre os substratos que compõem a parede celular vegetal, incluindo a celulose, hemiceluloses e lignina, produzindo uma decomposição mais profunda e alterando a morfologia do alvo de forma mais pronunciada, e cada espécie desse seleto grupo de fungos possui diferentes mecanismos de atuação na decomposição (Bari et al., 2020), onde, por exemplo, em *Pleurotus*

ostreatus mais de um mecanismo ativado pelo fungo para decomposição de madeira e a hemicelulose é o principal substrato utilizado (Bari et al., 2015).

Desse modo, os MBCs apresentam um grande potencial para desenvolvimento de tecnologia sustentável, visto a aptidão desses fungos a diversos ambientes e o emprego de resíduos de setores industriais, permitindo uma economia circular de reaproveitamento desses recursos. Estudos recentes demonstram que biomateriais tendo como base o micélio de *Ganoderma lucidum*, associado a estruturas porosas, foram capazes de alcançar características físicas semelhantes às encontradas em tijolos de argila, demonstrando o potencial desses materiais à medida que novos atributos e características são incorporadas na produção de biocompósitos ligados ao micélio (Sharma e Le Ferrand, 2025).

2.8. Produção Científica Associada a Produção de Compósitos Ligados à Micélio

O interesse pelos Compósitos Ligados à Micélio (MBCs) vem crescendo anualmente, principalmente por se mostrar como uma alternativa ecológica e pela possibilidade de ser implementada nas áreas de tecnologia e design. Segundo Sydor et al. (2021), os bancos de dados apontavam para 92 publicações científicas relacionadas ao tema e cerca de 200 documentos de patentes de tecnologias desenvolvidas até o momento de sua análise. A presença desse termo começou a ganhar força em meados 2019, a partir do qual a produção científica foi aumentando gradativamente nos anos seguintes (Gráfico 1). Dentre os principais países desenvolvedores de produção científica relacionada, os EUA, Tailândia e Alemanha ocupam os primeiros lugares, e o Brasil estando na 9ª posição (Gráfico 2).

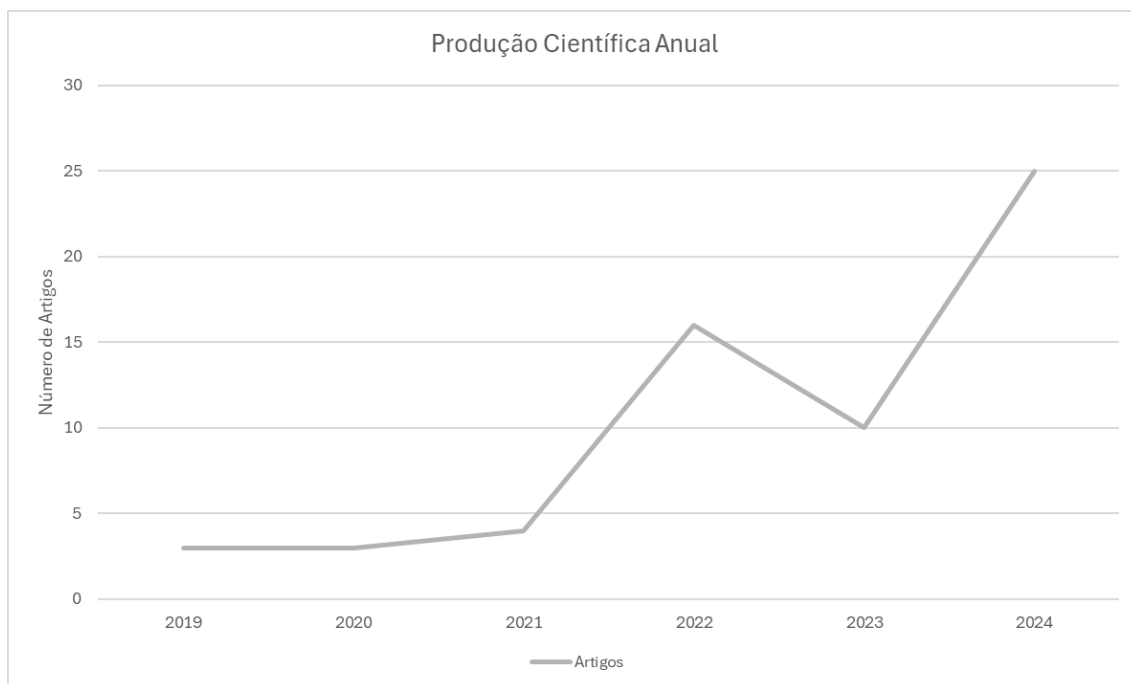


Gráfico 1: Produção científica anual de publicações originais, tendo como palavra-chave de busca “*Mycelium-based composites*”, a partir das ferramentas Scopus (Elsevier) e Web of Science (Clarivate) entre os anos de 2019 e 2024.

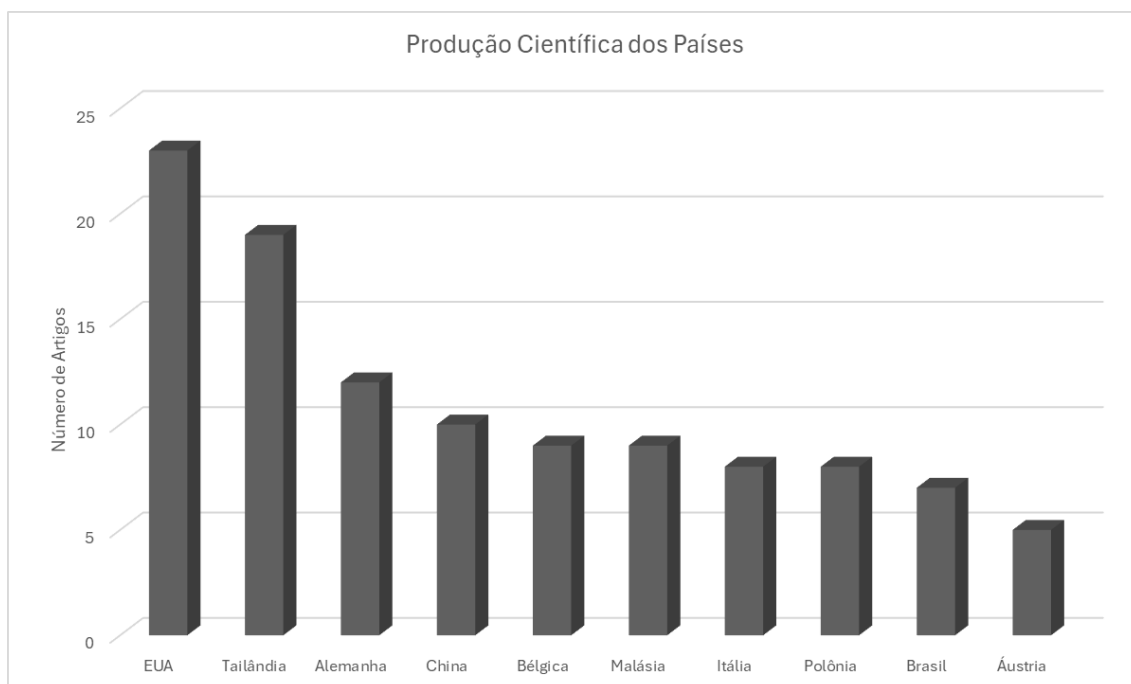


Gráfico 2: Principais países com produção científica, tendo como palavra-chave de busca “*Mycelium-based composites*”, a partir das ferramentas Scopus (Elsevier) e Web of Science (Clarivate).

Os termos mais populares e destacados nesses trabalhos foram se modificando nos últimos anos, onde “Biocompósitos”, “Fibras” e “Fabricação” eram mais utilizados, havendo um maior destaque para o termo “Resíduo” no último ano, reflexo das tendências sustentáveis do desenvolvimento tecnológico (Gráfico 3).

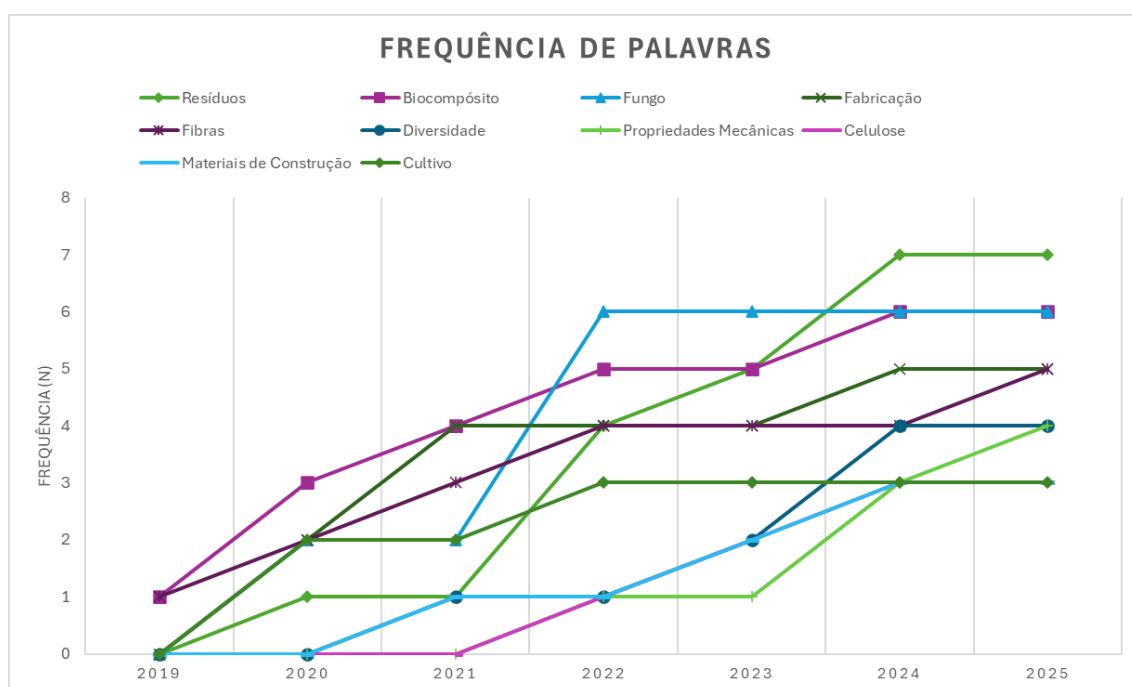


Gráfico 3: Frequência de palavras mais citadas, tendo como palavra-chave de busca “*Mycelium-based composites*”, a partir das ferramentas Scopus (Elsevier) e Web of Science (Clarivate) entre os anos de 2019 e 2024.

Tanto *Ganoderma lucidum* como *Pleurotus ostreatus* são fungos amplamente abordados nos trabalhos científicos, mas outros aspectos importantes associados à produção desses materiais como “Economia Circular”, “Fabricação Digital” e “novas metodologias de produção” vem ganhando espaço gradativamente (Figura 1). Desse

modo, o desenvolvimento científico de MBCs apresenta um amplo leque de possibilidades a ser explorado para o desenvolvimento científico mais sustentável.

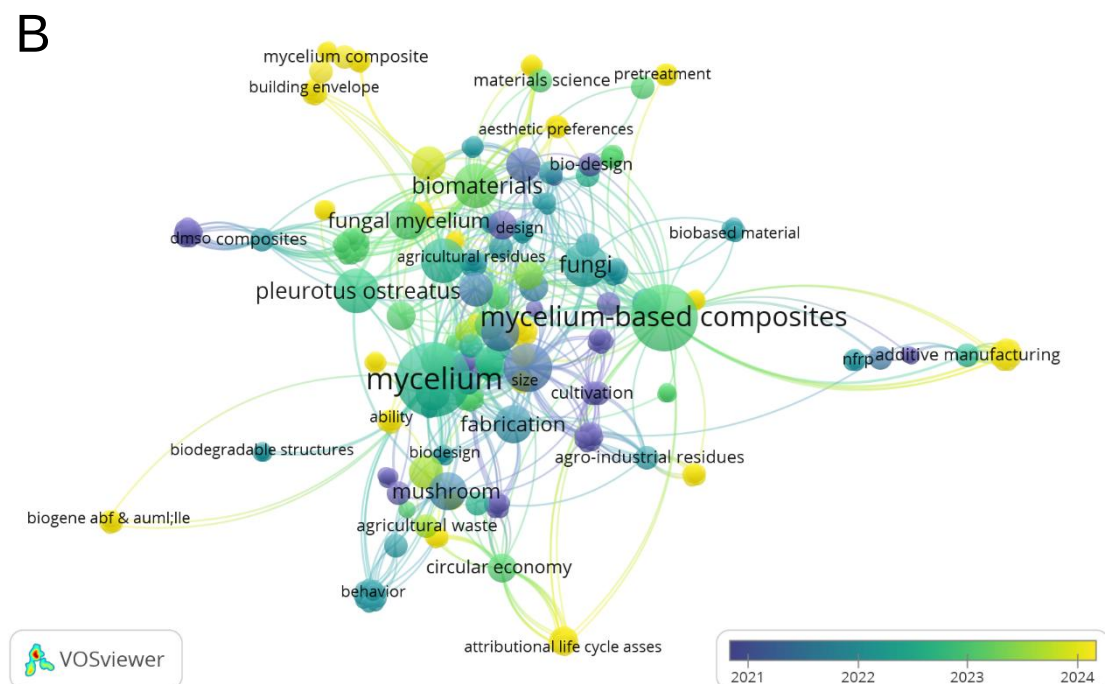
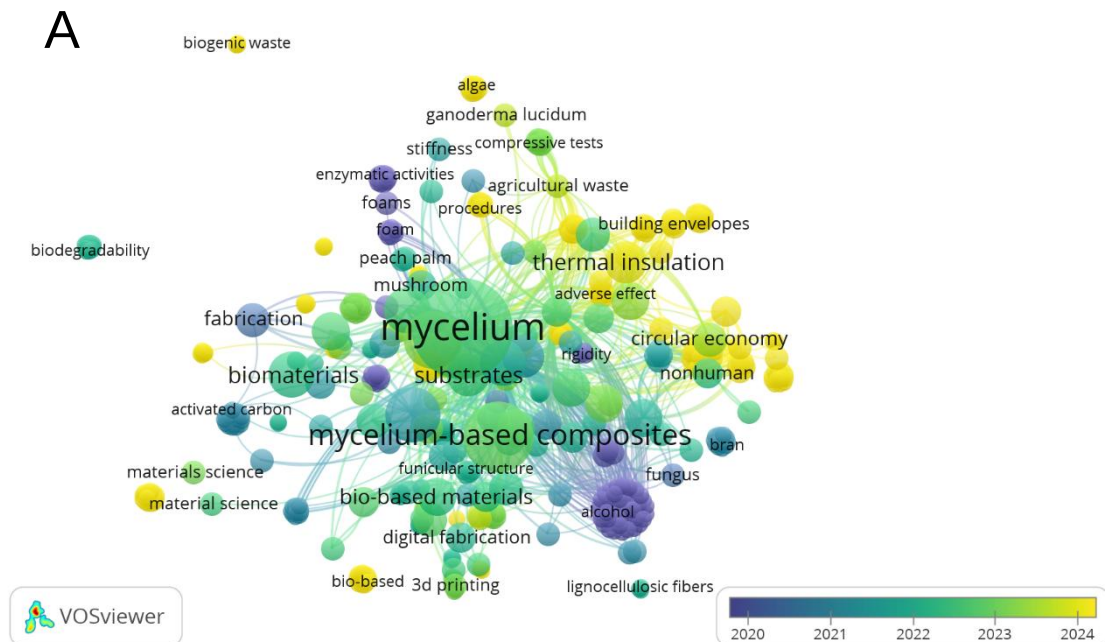


Figura 4: Co-ocorrência de palavras-chave mais utilizadas em publicações originais, tendo como palavra-chave de busca “*Mycelium-based composites*”, a partir das

ferramentas (A) Web of Science (Clarivate) e (B) Scopus (Elsevier) entre os anos de 2019 e 2024, com utilização do programa VOSViewer.

2.9. Técnicas Para Obtenção de Biomateriais à Base de Micélios

O desenvolvimento de um biocompósito fúngico sugere pelo menos seis etapas para a confecção do produto, a saber: 1) cultivo do isolado fúngico, 2) confecção e esterilização do substrato, 3) inoculação, 4) molde do substrato, 5) desativação e desinfestação do material e 6) transporte (Alemu et al., 2022). De acordo com (Singh et al. 2025) existem metodologias utilizadas na produção de biomateriais à base de micélios e, dentre elas, há principalmente 3 formas de inoculação para obtenção, sendo eles: 1) inoculação em estado líquido, 2) inoculação em estado sólido e 3) inoculação a base de *spawn* misturados. Utilizando principalmente os caldos de batata-dextrose, caldo de dextrose de malte de levedura e caldo de melaço de cana, a fermentação em estado líquido é a menos utilizada, visto que a produção de fungos nesse material costuma produzir biomassa com aspecto pastoso e peletizado, exigindo um processamento posterior para obtenção de um material coeso e adequado. Nesse método o fungo pode ser cultivado de forma estática ou sob agitação, onde no primeiro caso há menor gasto de energia e o material é coletado na interface líquido/ar e na segunda situação o fungo é submetido a uma rotação específica e o material fúngico permanece submerso durante o desenvolvimento (Singh et al. 2025). Na fermentação em estado sólido o inóculo fúngico é aplicado diretamente sobre o substrato lignocelulósico, formando uma camada sobre esse material, esse substrato é inserido em um molde e incubado para a formação do biomaterial. Por último, a fermentação à base de *spawn* consiste num inóculo fúngico onde os tecidos do cogumelo (hifas, esporos) são envolvidos em algum veículo nutritivo (meio ou substrato adequado à espécie), posteriormente é inoculado no substrato alvo. Esse método rende bons resultados para cobertura total de substratos inoculados (Nashiruddin et al., 2022). Além do substrato e formas de inoculação, as características físicas do biocompósito é de grande importância para o desenvolvimento do produto.

Os resíduos, como casca de café, palhas de trigo, arroz e milho, bagaço e palha de cana-de-açúcar, folhas de bananeira, além de outros substratos, são materiais orgânicos de produção renovável com grande conteúdo de carbono e energia (Jiang et al., 2017; Appels et al., 2019; Girometta et al., 2019). Na natureza o processo de colonização é lento

devido as condições do ambiente, entretanto, em condições axênicas esse processo sofre uma aceleração, permitindo que as pesquisas sejam otimizadas (EIRA, 2003). As fontes de nutrientes mais comumente usadas como suplemento do substrato são os farelos de soja e o de arroz, uma vez que várias espécies de fungos Basidiomicetos têm o crescimento dos seus micélios favorecidos com esses componentes (ROSSI; MONTEIRO; MACHADO, 2001). Grande variedade de resíduos são utilizados como substratos para cultivar fungos. Aqueles de natureza lignocelulósicos têm grande oferta de carbono. Pode ser usado algumas substâncias químicas como carbonato de cálcio (CaCO_3) e sulfato de magnésio (MgSO_4). Outros materiais como os farelos, oferta principalmente nitrogênio, micro e macronutrientes além de aminoácidos e proteínas. Usualmente é feita uma mistura incluindo esses dois compostos na formulação do substrato. Porém as concentrações requeridas em tais formulações são bastante variadas e a opção é por produtos encontrados na região (MACEDO et al., 2012). Os resultados obtidos no cultivo de macrofungos, depende dos fatores abióticos como umidade, oxigênio, temperatura, e também da formulação do substrato e do tipo de cogumelo com sua especificidade para tal meio de cultivo.

2.10. Principais Características dos Biomateriais à Base de Micélios

As características de um biocompósito será direcionada principalmente pelos dois componentes principais do desenvolvimento do produto: a espécie de fungo empregada e o substrato, produzindo uma variedade de materiais e com características distintas. As principais características físicas avaliadas são as mesmas utilizadas em produtos tradicionais, que são: densidade, elasticidade, resistência à compressão, resistência à flexão e resistência à tensão. A densidade de um material se relaciona com a quantidade de matéria compacta e a elasticidade se refere ao quanto esse material é rígido e resistente à deformação elástica, o que se relacionam com a proporção de grãos, fibras, cascas etc., no substrato, associados ao tipo de micélio. A resistência à compressão se refere à capacidade de um material em suportar a aplicação de cargas compressivas. A resistência à flexão é associada à tensão pontual, de fratura de um substrato durante a flexão, de modo a gerar ruptura. Por outro lado, a resistência à tensão é a capacidade de um material em suportar uma força de tração, a tensão máxima que ele pode suportar ao ser esticado antes de gerar uma ruptura (Yang et al., 2021). Os resultados obtidos em relação aos materiais tradicionais variam de acordo com os componentes empregados, mas resultados

promissores são obtidos à medida que novos isolados fúngicos e substratos são estudados, produzindo materiais de qualidade. Sharma e Le Ferrand (2025) obtiveram um biomaterial a base de *Ganoderma lucidum* com módulo de Young, resistência, equiparável aos tijolos de argila. O pré-tratamento do material, após a sua formação, também pode aumentar outros parâmetros, como observado por Appels et al., (2018) em que o aquecimento do material durante a prensagem produz um material mais resistente à tração, melhorando a resistência à flexão. Desse modo, os isolados fúngicos utilizados, o substrato escolhido e os tratamentos do biocompósito são capazes de gerar uma grande quantidade de materiais potenciais para utilização.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Desenvolver um biomaterial à base de micélio de resíduos agroindustriais para o campo da construção.

3.2. Objetivos específicos

Avaliar o uso de resíduos agroindustriais como substrato para o desenvolvimento de um material composto à base de micélio;

Avaliar o potencial de aplicação de materiais compostos à base de micélio no setor da construção em função de suas propriedades físico-mecânicas;

Estabelecer uma metodologia de processamento para a obtenção de materiais alternativos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Metodologia de cultivo de biomateriais

O desenvolvimento do biomaterial através do cultivo do micélio do fungo *Ganoderma lucidum*, *Panus strigellus* e *Pleutorus ostreatus* em substrato composto por resíduos da agroindústria local, foi realizado de acordo com a metodologia relatada na literatura com diversas modificações (Singh et al. 2025).

4.1.1 Preparo do Inóculo/Spawn (micélio)

Para o preparo do inóculo micelial, foram utilizados grãos de alpiste misto (*Phalaris canariensis* L.). Inicialmente, os grãos foram submetidos a hidratação em água potável por um período de 24 horas, com o intuito de facilitar o processo de colonização fúngica. Decorrido esse período, os grãos hidratados foram submetidos a aquecimento em forno de micro-ondas, com potência máxima, durante 5 minutos. Este procedimento visou amolecer os grãos, tornando seus nutrientes mais acessíveis ao micélio fúngico. Posteriormente, foi adicionado 1% de carbonato de cálcio (CaCO_3) em relação ao peso total dos grãos úmidos. A adição do CaCO_3 teve como objetivo a regulação do pH do substrato, mantendo-o em níveis adequados ao desenvolvimento do fungo e prevenindo a acidificação do meio durante o crescimento micelial. Os grãos preparados foram então acondicionados em recipientes de vidro com tampa, os quais foram selados e esterilizados em autoclave a 120 °C, sob pressão de 1 atm, durante 40 minutos. Essa etapa teve como finalidade a eliminação de possíveis agentes contaminantes, assegurando condições assépticas para o cultivo. Após a esterilização, os recipientes foram transferidos para uma câmara de fluxo laminar previamente higienizada com álcool 70% e luz UV. Após a inoculação, os recipientes foram armazenados sob refrigeração a 5 °C até o momento de sua utilização nos experimentos.

4.1.2 Inoculação do grão/Spawn

Para a produção dos inóculos miceliais, fragmentos de meio de cultura sólido à base de Batata-Dextrose-Ágar (BDA), previamente colonizados pelas espécies fúngicas

Ganoderma lucidum, *Panus striguellus* e *Pleurotus ostreatus*, foram utilizados como fonte de micélio ativo. Os fragmentos foram retirados de placas de Petri, cultivadas em condições assépticas e incubadas até completo desenvolvimento micelial. A inoculação foi realizada em frascos de vidro contendo grãos de alpiste (*Phalaris canariensis* L.), os quais haviam sido previamente preparados. Após resfriamento completo dos frascos, a inoculação foi conduzida em câmara de fluxo laminar, sob condições estéreis. Utilizando instrumentos previamente esterilizados, foram transferidos pedaços do meio BDA contendo micélio ativo para o interior dos frascos contendo os grãos de alpiste esterilizados. O micélio inoculado passou a colonizar os grãos, utilizando os nutrientes disponíveis no substrato como fonte de energia e carbono. Os frascos inoculados foram incubados a uma temperatura constante de 25 °C, em ambiente com baixa luminosidade e boa ventilação, por um período de 7 dias. Durante esse tempo, observou-se o crescimento e a distribuição progressiva do micélio sobre a superfície e o interior dos grãos, até a colonização completa do substrato. Finalizado o período de incubação, os inóculos colonizados foram armazenados sob refrigeração a 5 °C, com o objetivo de preservar a viabilidade do micélio até sua utilização posterior nos experimentos de cultivo ou produção de biomateriais.

4.1.3 Produção do substrato de cultivo

Para a formulação dos substratos de cultivo fúngico, foram coletados resíduos orgânicos no entorno da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), localizada no município de Seropédica, estado do Rio de Janeiro – RJ. Os materiais selecionados para a composição do substrato incluíram: serragem de madeira *Pinus* e *Eucalyptus spp.*, capim seco *Pennisetum purpureum* e fibra de coco, conforme mostrado na figura 5.



Figura 5: Substratos utilizados na produção dos biomateriais. A: Capim, B: Fibra de coco, C: Serragem de Eucalipto e Pinus.

Antes da formulação, os materiais foram classificados quanto ao tamanho das partículas, sendo padronizados para a faixa de 5 a 15 mm, a fim de garantir uma estrutura física adequada para aeração, retenção de umidade e desenvolvimento micelial homogêneo. Figura 5. A mistura do substrato foi preparada com base na proporção indicada na Tabela 1, e corrigida em umidade até atingir aproximadamente 60% (m/v), com adição de água potável. Para ajuste do pH, foi adicionado 1% (m/m) de carbonato de cálcio (CaCO_3) em relação ao peso total da mistura em peso seco. Após a homogeneização, o substrato foi acondicionado em sacos autoclaváveis e vedados. Em seguida, foi submetido à esterilização em autoclave, a uma temperatura entre 120 e 127 °C, sob pressão de 1 a 1,5 atm, durante 60 minutos. Este processo teve por finalidade a eliminação de microrganismos competidores ou patogênicos presentes nos resíduos orgânicos, assegurando a assepsia necessária para o desenvolvimento do fungo de interesse. Ao término do ciclo de esterilização, os substratos foram mantidos em repouso até que atingissem a temperatura ambiente, sendo então encaminhados, sob condições estéreis, para a etapa de inoculação micelial.

Tabela 1. Composição do substrato (em %) a partir de fibra de coco, serragem e capim.

Substrato	Componente (%)		
	Fibra de coco	Serragem	Capim
Sub	25	50	25

4.1.4 Colonização (Incubação Primária)

O substrato inoculado a partir do grão semente das espécies *Ganoderma lucidum*, *Panus striguellus* e *Pleutorus ostreatus* foi incubado em câmara climatizada com temperatura de 24-26°C, na ausência de luz e umidade relativa em torno de 80%, visando permitir e facilitar a completa colonização do substrato da maneira mais uniforme possível. O processo de incubação foi dividido em duas fases, com o objetivo de garantir o crescimento eficaz e controlado do micélio no substrato.

Fase 1: Colonização prévia:

Inicialmente, o substrato previamente inoculado com o micélio foi acondicionado em uma câmara de incubação, sob condições ambientais controladas especificamente, temperatura e umidade otimizadas para o desenvolvimento fúngico. Durante um período de 2 dias, ocorre a colonização inicial, onde o micélio começa a se desenvolver, espalhando-se pelas partículas do substrato de forma progressiva. Este período é crucial para estabelecer uma base micelial ativa e metabolicamente funcional.

Fase 2: Colonização em molde (protótipo):

Concluído o período inicial, todo o conteúdo do substrato parcialmente colonizado da Fase 1 é transferido para um molde ou protótipo previamente definido, figura 6, elaborado a partir de tubo de pvc com altura e diâmetro de 40 mm, que serviu como molde para os testes posteriores.



Figura 6: Molde elaborado a partir de tubo de pvc, com substrato previamente colonizado.

O material composto é então compactado no molde, no formato final desejado, permitindo que o micélio complete a colonização de toda a matriz ao longo de um período adicional de 10 dias, também sob condições ambientais controladas.

4.1.5 Pós-incubação

Após os 10 dias de incubação no molde, os protótipos são cuidadosamente desenformados e mantidos em repouso por mais 8 dias, permitindo a uniformização final da colonização micelial e garantindo a homogeneidade da estrutura biológica ao longo de todo o material.

4.1.6 Secagem

Finalizado o período de incubação e a fase de homogeneização da colonização micelial, as amostras previamente desenformadas são submetidas ao processo de secagem térmica. O principal objetivo da secagem é cessar o crescimento do micélio, impedindo a continuidade de sua atividade biológica e evitando alterações estruturais ou proliferação indesejada de microrganismos. Além disso, a remoção controlada da umidade interna contribui significativamente para o aumento da resistência mecânica, a durabilidade e a conservação das propriedades físico e químicas do material. As amostras foram inseridas em uma estufa sob temperatura constante de 60 °C, durante um período contínuo de 5

horas. Essa condição visa garantir a completa inativação do micélio sem comprometer a integridade estrutural do substrato colonizado. Ao final do processo, os corpos de prova apresentaram-se completamente secos ao toque, com redução significativa da umidade residual e endurecimento da estrutura, caracterizando o término do processo de biofabricação. (Figura 7).

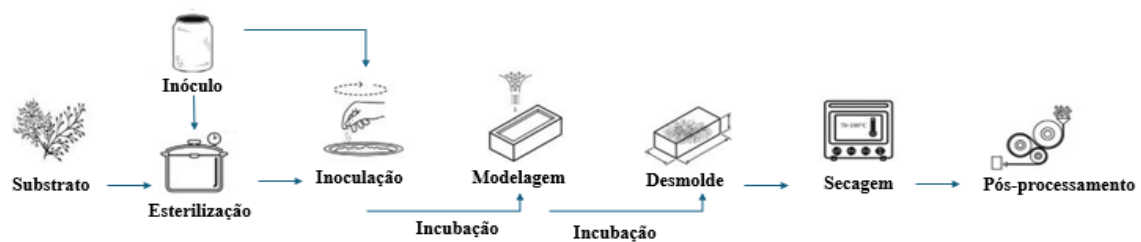


Figura 7: Esquema do método de produção de um biomaterial à base de micélio (Fonte: Adaptado de Elsacker et al., 2020)

4.2. Delineamento Experimental

O experimento foi conduzido em laboratório, no Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFRRJ. Foram utilizados recipientes individuais de policloreto de vinila (PVC), que atuaram como unidades experimentais. Cada recipiente foi devidamente higienizado e identificado, garantindo rastreabilidade e padronização entre as repetições. Cada unidade experimental foi preenchida com uma mistura composta por inóculo e substrato, preparados de forma padronizada. O inóculo consistiu em grãos colonizados por micélio fúngico, utilizados como fonte de microrganismos ativos e uniformemente distribuídos na massa do substrato, de modo a garantir a colonização homogênea do material. O substrato base foi constituído por uma mistura de fibra de coco, serragem e capim, previamente esterilizados na proporção de 1:2:1 (volume/volume), respectivamente. O delineamento experimental foi estruturado com três tratamentos distintos, que corresponderam às 3 espécies de fungos utilizadas. Cada tratamento foi composto por 16 repetições, totalizando 48 unidades experimentais. As análises foram feitas pelo teste-t, a partir dos parâmetros avaliados para corpos de prova de biomaterial obtido a partir de *Ganoderma*, *Panus* e *Pleurotus*.

4.3. Caracterização do biomaterial

Aspectos ecológicos: crescimento e colonização

A avaliação dos aspectos ecológicos associados ao crescimento e colonização micelial foi conduzida com foco na eficiência do desenvolvimento fúngico nos substratos formulados. O crescimento do micélio sobre os substratos fibrosos (serragem, fibra de coco e capim seco) foi monitorado visualmente ao longo do período de colonização, com registros fotográficos periódicos e anotações descritivas quanto à velocidade de crescimento, aparência do micélio, coloração e sinais de contaminação. A avaliação seguiu critérios qualitativos, com base em escalas adaptadas da literatura para indicar o grau de colonização (parcial, moderada ou total). O comportamento ecológico do micélio foi analisado sob as seguintes perspectivas:

- i. Capacidade adaptativa ao substrato: analisou-se a compatibilidade da espécie fúngica com o substrato orgânico utilizado, considerando a taxa de colonização em diferentes resíduos lignocelulósicos, como indicativo de eficiência metabólica e degradação da biomassa vegetal.
- ii. Velocidade de colonização: determinada com base no tempo necessário para a ocupação total da superfície do substrato. Essa variável foi influenciada pela espécie fúngica, pela umidade do substrato, granulometria e pela aeração.
- iii. Uniformidade do crescimento: avaliada pela homogeneidade da cobertura micelial, indicando a capacidade do fungo de explorar o ambiente de forma eficiente e contínua.
- iv. Estabilidade ecológica do sistema: inferida a partir da ausência de contaminações competitivas (bactérias, mofos, leveduras) durante o cultivo. Substratos que apresentaram menor incidência de contaminação indicaram maior compatibilidade ecológica com o fungo de interesse e boa eficiência de esterilização. MAZIERO et al. (1990) e RAGUNATHAN et al. (1996)

4.4. Avaliação da resistência mecânica do biomaterial por teste de compressão

A resistência mecânica dos corpos de prova produzidos a partir de biomateriais à base de micélio foi avaliada por meio de ensaios de compressão uniaxial, utilizando um analisador de textura digital (texturômetro) equipado com célula de carga compatível à resistência esperada do material. O procedimento adotado baseou-se no método de Análise de Perfil de Textura (TPA – *Texture Profile Analysis*), técnica amplamente utilizada na ciência de materiais e alimentos para caracterizar propriedades mecânicas como dureza, elasticidade, coesividade e resiliência. A TPA simula a compressão cíclica de uma amostra, sendo composta por dois ciclos consecutivos de compressão, que permitem a obtenção de parâmetros mecânicos a partir da resposta do material à deformação.

As amostras analisadas apresentavam formato cilíndrico e dimensões previamente padronizadas. Cada corpo de prova foi posicionado centralmente sobre a base inferior da prensa do equipamento, de modo que a superfície de contato com a sonda de compressão estivesse nivelada. A célula de carga foi então ajustada de forma que a sonda superior (plataforma de compressão) entrasse em contato com a superfície superior da amostra sem exercer pressão inicial, garantindo uma leitura precisa a partir do ponto zero.

O texturômetro foi configurado com os seguintes parâmetros:

- Força de compressão: 0,049 Newtons
- Velocidade da sonda: 2 mm/s
- Taxa de deformação: 50%, definida com base na altura inicial da amostra
- Ciclo de compressão: duplo (TPA) com tempo de retenção entre os ciclos padronizado em 5 segundos

Após a configuração dos parâmetros, o equipamento foi acionado, iniciando o ciclo de compressão. A força aplicada e a deformação sofrida pela amostra foram registradas em tempo real, gerando gráficos de tensão (força/área) versus deformação (ϵ), que permitiram a caracterização mecânica do material. (Figura 8).

A partir da curva tensão-deformação gerada, foi possível identificar os seguintes parâmetros:

- Dureza: valor máximo de força registrada no primeiro ciclo

- Elasticidade (ou recuperação): capacidade do material de retornar à sua forma original entre os ciclos
- Coesividade: relação entre a área do segundo pico e do primeiro
- Resiliência: área sob a curva de recuo no primeiro ciclo, indicando a energia armazenada e devolvida pelo material

O ensaio seguiu, de forma adaptada, os princípios estabelecidos pelas seguintes normas técnicas:

- ASTM D2166 / D2166M – 16: *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, frequentemente utilizada como base metodológica para testes de compressão simples em materiais com comportamento plástico ou coesivo, como biocompósitos.
- ASTM D638 – 22: *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, como referência para preparação de corpos de prova e análise comparativa de propriedades mecânicas de materiais poliméricos.
- ISO 178:2019: *Plastics — Determination of flexural properties*, norma internacional que fornece diretrizes para avaliação da resistência à flexão, frequentemente aplicada em combinação com ensaios de compressão para materiais biocompósitos.

A aplicação dessas normas, mesmo com adaptações específicas ao material em estudo, fornece base metodológica aos resultados obtidos e permite comparar com a literatura técnica e científica.

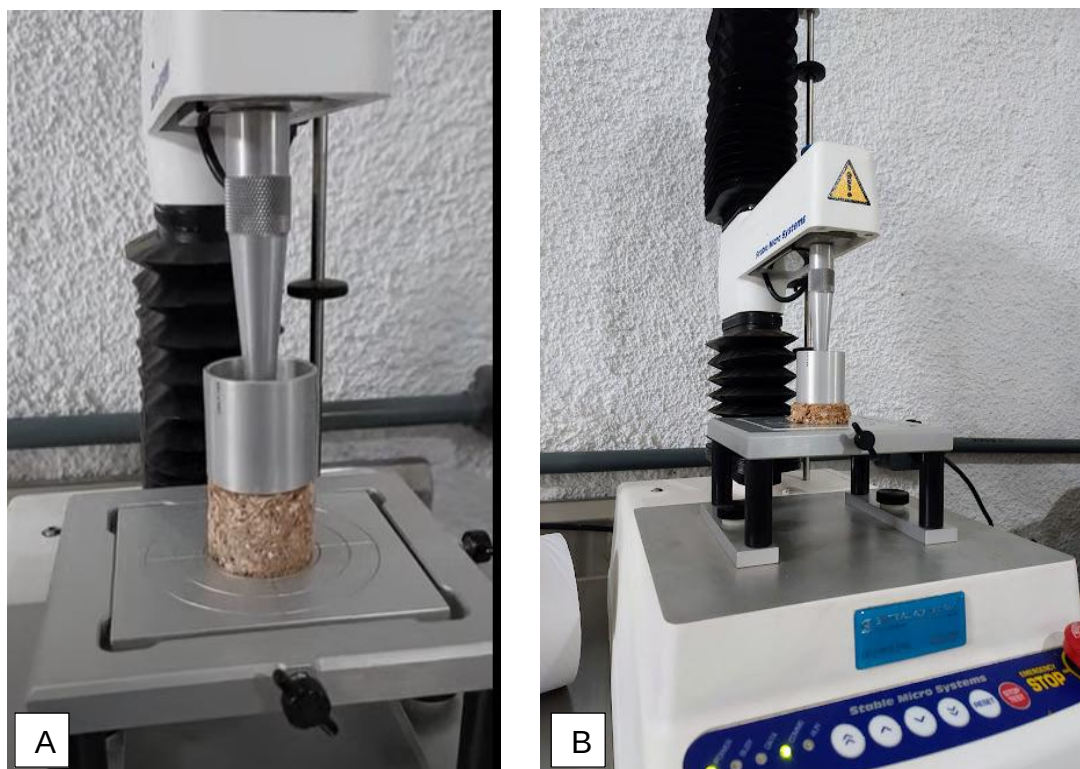


Figura 8: A - amostra posicionada em texturômetro para ensaio; B - amostra deformada após a realização do teste.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Ajustes no Processo de Desenvolvimento do Biomaterial Micelial

5.1.1 Adaptações do inóculo

Durante o processo de desenvolvimento do biomaterial à base de micélio, algumas modificações metodológicas foram implementadas com o intuito de otimizar o desempenho do material e aprimorar suas características físicas e estéticas. Tais ajustes foram necessários em função das condições experimentais observadas e da necessidade de adequação do produto final às propriedades desejadas para aplicação na construção civil. Inicialmente, o protocolo experimental previa a utilização de grãos de trigo (*Triticum aestivum*) como base para a produção do inóculo fúngico, o qual era empregado na inoculação dos substratos lignocelulósicos. Os grãos de trigo foram escolhidos por serem um substrato nutritivo, acessível e tradicionalmente utilizado em cultivos miceliais,

fornecendo uma fonte rica em carboidratos e proteínas que favorecem o crescimento vigoroso do micélio. No entanto, ao longo do processo, observou-se que esse método apresentava limitações no aspecto físico e estético do biomaterial resultante. O uso de grãos inteiros ocasionava a formação de um material final com textura mais grosseira, dificultando a obtenção de uma superfície uniforme e um acabamento visualmente satisfatório.

Além disso, durante o crescimento micelial, parte dos grãos permanecia visivelmente exposto na superfície do substrato, mesmo após a completa colonização e o processo de secagem. Essa característica conferia ao biomaterial um aspecto irregular e heterogêneo, o que comprometia sua aparência visual, homogeneidade estrutural e, potencialmente, sua coerência em aplicações construtivas que demandam maior uniformidade. Diante dessa observação, foi necessário adaptar o processo de inoculação, buscando alternativas que resultassem em uma textura mais compacta e acabamento superficial mais fino. Essa modificação visou não apenas aprimorar a qualidade estética e tátil do biomaterial, mas também favorecer uma melhor integração do micélio com o substrato, promovendo a formação de uma matriz mais homogênea e coesa.

As alterações subsequentes incluíram a substituição dos grãos de trigo por grãos de alpeste (*Phalaris canariensis*), mantendo a forma de inoculação, porém com características diferentes do grão, mais finos e uniformes, permitindo uma distribuição micelial mais homogênea e melhorando as imperfeições visuais no produto. Essa adaptação resultou em um melhor acabamento superficial, redução da exposição de partículas não colonizadas e maior uniformidade estrutural do biomaterial produzido.

5.1.2 Colonização interna

Outro aspecto relevante observado durante o processo de produção do biomaterial foi o comportamento da colonização interna do substrato pelo micélio. Inicialmente, seguiu-se o protocolo tradicional de inoculação, no qual o inóculo micelial era aplicado somente na superfície do substrato, formando uma camada superior de micélio, sem que houvesse mistura direta entre o inóculo e o material de base (Elsacker et al., 2020; Vanden, 2021). Essa metodologia resultava em colonização predominantemente superficial, uma vez que o micélio tinha acesso apenas à porção externa do substrato, com limitação de penetração nas camadas mais internas. Durante o acompanhamento do

desenvolvimento micelial, constatou-se que, embora a superfície apresentasse boa colonização, com crescimento visível, denso e aparentemente uniforme, o interior do substrato permanecia pouco ou totalmente não colonizado. Essa deficiência interna tornou-se evidente no momento da secagem e manipulação do biomaterial, quando foi possível observar regiões centrais desiguais, sem coesão e com ausência de micélio consolidado, indicando que o fungo não havia conseguido colonizar o núcleo do material.

Esse fato pode ser explicado por diversos fatores. Primeiramente, a falta de contato direto entre o inóculo e as camadas internas do substrato dificulta a propagação inicial do micélio, que depende da disponibilidade de oxigênio, umidade adequada e acesso a nutrientes para se desenvolver. Além disso, a distribuição desigual da umidade e a baixa aeração nas porções internas podem ter criado um microambiente desfavorável à colonização, resultando em crescimento restrito à superfície. Como consequência, o biomaterial final apresentou heterogeneidade estrutural, com uma camada externa consolidada e rígida contrastando com um núcleo interno mais frágil e sem colonização micelial completa. Essa falta de uniformidade compromete as propriedades mecânicas e a integridade estrutural do material, tornando-o menos resistente e inadequado para determinadas aplicações. (Figura 9).



Figura 9: Ajustes no processo de desenvolvimento do Biomaterial. Colonização incompleta no interior.

Para corrigir o problema, foi adotada uma estratégia de pré-colonização do material antes de sua moldagem. Essa modificação no procedimento teve como objetivo assegurar uma distribuição mais uniforme do micélio em todo o substrato, promovendo uma colonização homogênea e eficiente, tanto na superfície quanto nas camadas internas. O novo procedimento consistiu em adicionar o inóculo micelial diretamente ao substrato previamente autoclavado, ainda no interior de sacos plásticos esterilizados, de forma a manter condições assépticas e evitar contaminações. Em seguida, a bolsa foi agitada manualmente, garantindo que o inóculo se misturasse completamente ao substrato, promovendo uma distribuição uniforme dos grãos colonizados. Essa etapa de homogeneização manual foi essencial para assegurar que o micélio tivesse pontos de contato em toda a massa do substrato, favorecendo seu crescimento tridimensional e contínuo. Após a homogeneização, as bolsas contendo o substrato inoculado foram deixadas em repouso por um período de incubação inicial (2 dias), conhecido como fase de pré-colonização. Durante essa etapa, o micélio começou a se desenvolver e se expandir internamente, colonizando de forma progressiva toda a massa do substrato no ambiente controlado das bolsas. Esse processo resultou em um material parcialmente colonizado, denso e visualmente uniforme, pronto para ser utilizado nas etapas seguintes.

Quando a colonização inicial atingiu o ponto desejado, evidenciado pelo crescimento micelial visível e consistente em toda a bolsa, o substrato pré-colonizado foi transferido para os recipientes utilizados como moldes, onde ocorreu a continuação do processo de colonização e consolidação do biomaterial. Essa etapa final, permitiu que o micélio completasse seu desenvolvimento, interligando-se entre as partículas do substrato e formando uma rede micelial contínua e compacta, característica essencial para a formação de um biocompósito coeso e resistente. (Figura 10)



Figura 10: Ajustes no processo de desenvolvimento do Biomaterial. Colonização ocorrendo na parte interior.

5.2. Aspectos ecológicos: Avaliação da Combinação Fungo-Substrato e Crescimento Micelial

Durante a etapa inicial do estudo, foi realizada a análise da combinação entre o fungo selecionado e o substrato utilizado, com o propósito de identificar as melhores interações biológicas para a formação e o desenvolvimento de biomateriais miceliais. Essa observação visou explorar o potencial de crescimento, colonização e coesão estrutural do micélio, fundamentais para o desempenho físico do material final, bem como para ampliar as possibilidades de aplicações tecnológicas desses biocompósitos. A seleção e combinação do fungo com o substrato foram consideradas etapas determinantes para a obtenção de um biomaterial de qualidade, uma vez que diferentes espécies fúngicas apresentam variações em seu padrão de crescimento, densidade micelial, aderência e capacidade de degradação do material lignocelulósico. Da mesma forma, a composição do substrato incluindo tipos de fibras vegetais, teor de umidade, granulometria e proporção entre os componentes influencia diretamente o desenvolvimento do micélio e as propriedades mecânicas do material resultante. Para a avaliação da qualidade e do vigor do micélio, foi realizado um monitoramento diário da corrida micelial ao longo de um período de 20 dias consecutivos. Esse acompanhamento teve como finalidade observar a velocidade de colonização do substrato pelo fungo e o aspecto morfológico do

crescimento, considerando parâmetros como coloração, textura e densidade do micélio formado (Figura 11). No processo de colonização foram realizadas análises visuais e fotográficas para avaliar parâmetros como, coloração, textura, homogeneidade e presença de contaminações.

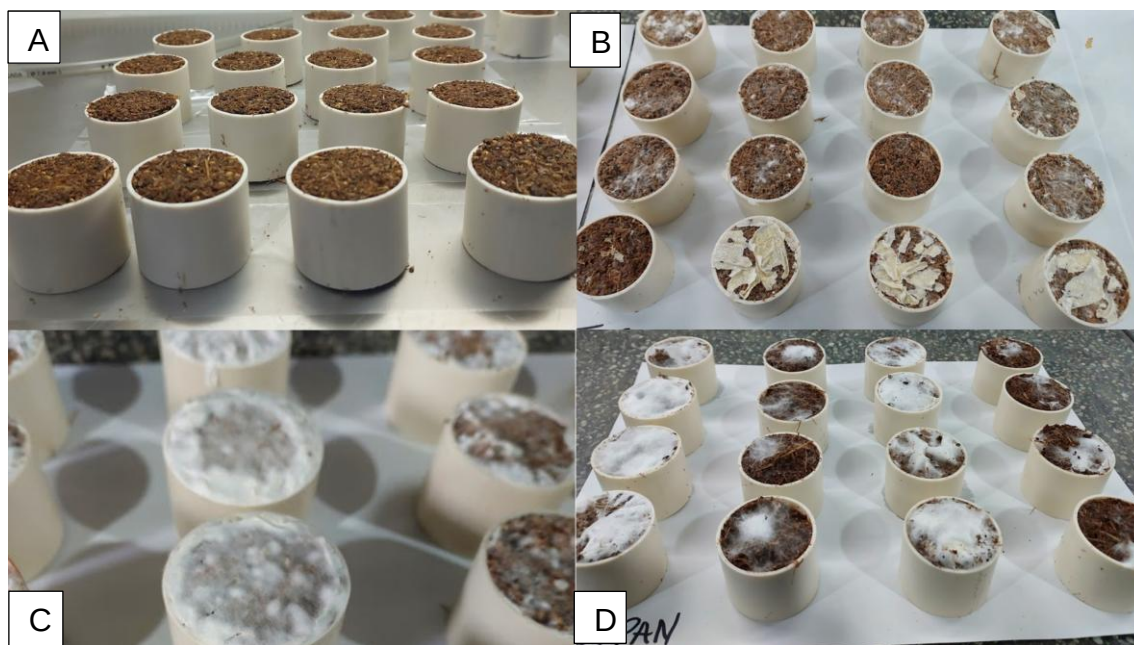


Figura 11: Amostras durante crescimento micelial. **A** - Substrato inoculado em formas pvc; **B** - Colonização do fungo *Pleurotus*, **C** - *Ganoderma*, e **D** - Colonização de *Panus strigellus*.

Essas características foram consideradas indicadores do vigor micelial e da compatibilidade entre o fungo e o substrato. O micélio com coloração branca intensa, textura densa e crescimento uniforme foi considerado como de boa qualidade, enquanto micélios com coloração amarelada, crescimento irregular ou presença de zonas contaminadas foram classificados como de baixa qualidade ou não compatíveis. Os dados obtidos permitiram comparar a velocidade média de crescimento micelial e o tempo total necessário para a colonização completa do substrato entre os diferentes tratamentos. A partir dessas observações, foram identificadas as combinações fungo-substrato mais promissoras, que apresentaram maior taxa de crescimento, melhor homogeneidade e maior aderência estrutural do micélio.

Essas combinações foram selecionadas para as etapas subsequentes de produção e consolidação do biomaterial, uma vez que demonstraram elevado potencial de formação

de matrizes compactas e coesas, características desejáveis para o desenvolvimento de biocompósitos miceliais com aplicação construtiva.

De acordo com os resultados obtidos durante o experimento, observou-se que *Ganoderma lucidum* apresentou o melhor desempenho no desenvolvimento micelial entre as espécies avaliadas. Esse, demonstrou maior velocidade de colonização do substrato, cobrindo toda a superfície de forma homogênea e contínua em menor tempo, (Figura 11). Além disso, destacou-se pela uniformidade no crescimento micelial, formando uma camada densa, compacta e de coloração característica, o que evidencia um crescimento vigoroso e bem estabelecido. Outro ponto relevante foi a baixa taxa de contaminação observada nos cultivos com essa espécie, indicando uma boa adaptação às condições experimentais e maior competitividade frente a microrganismos contaminantes.

As espécies *Pleurotus ostreatus* e *Panus striguellus* também apresentaram desenvolvimento micelial. Entretanto, o desempenho dessas espécies foi ligeiramente inferior ao observado em *G. lucidum*. (figura 12). Ambas mostraram boa colonização do substrato, mas com menor velocidade de crescimento e menor uniformidade na distribuição micelial. Além disso, em alguns casos, observou-se leve incidência de contaminações, o que pode ter influenciado na eficiência do processo de colonização. De modo geral, os resultados indicam que *G. lucidum* possui características biológicas mais adequadas para o desenvolvimento do biomaterial proposto, devido à sua rápida colonização, crescimento uniforme e maior resistência a contaminações, enquanto *Pleurotus ostreatus* e *Panus striguellus* se mostraram opções viáveis, mas com necessidade de otimização das condições de cultivo para alcançar o mesmo nível de desempenho.



Figura 12: Colonização de *Panus striguellus*, *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus* respectivamente, após 20 dias.

A composição do substrato apresentou uma proporção maior de serragem, o que pode ter influenciado significativamente o desempenho das espécies avaliadas durante o processo de colonização. A proporção dos componentes do substrato utilizado desempenha um papel fundamental no desenvolvimento e colonização do micélio fúngico, uma vez que determina a disponibilidade de nutrientes, a estrutura física e as condições de aeração e umidade necessárias para o crescimento do fungo (KIM et al., 2020). A serragem é um material lignocelulósico rico em celulose, hemicelulose e lignina, compostos que servem como fontes de carbono e energia para fungos degradadores de madeira, especialmente os basidiomicetos. Entre as espécies analisadas, o *Ganoderma lucidum* demonstrou melhor adaptação a esse tipo de substrato, o que está de acordo com sua natureza. Essa afinidade permite ao fungo utilizar de forma mais eficiente os componentes lignocelulósicos, resultando em uma colonização mais rápida, uniforme e densa.

Por outro lado, espécies como *Pleurotus ostreatus* e *Panus striguellus*, embora também sejam fungos lignocelulolíticos, podem apresentar preferências por substratos com maior teor de nutrientes facilmente degradáveis, como resíduos agrícolas ricos em amido ou compostos nitrogenados (EIRA, 2004). SANCHES (1999). Assim, a predominância da serragem na mistura pode ter criado um ambiente mais favorável ao *G. lucidum*, mas menos ideal para as demais espécies, resultando em um desempenho diferenciado entre elas.

Além disso, o equilíbrio entre serragem e outros componentes orgânicos do substrato influencia parâmetros físicos importantes, como porosidade retenção de umidade. Uma quantidade excessiva de serragem tende a aumentar a densidade do substrato, o que pode reduzir a aeração e dificultar o crescimento de algumas espécies menos adaptadas a condições compactas. No caso do *G. lucidum*, essa característica não representa uma limitação, pois o fungo possui um micélio robusto, capaz de penetrar e degradar materiais mais densos (Jiang et al., 2017).

Portanto, pode-se destacar que a maior proporção de serragem no substrato foi um fator determinante para o melhor desempenho do *G. lucidum*, favorecendo sua colonização acelerada e eficiente, enquanto as demais espécies, embora viáveis, mostraram desenvolvimento mais lento devido a diferenças fisiológicas e nutricionais em relação à composição do substrato.

As características do biocompósito de micélio são também fortemente influenciadas pela espécie fúngica utilizada no seu desenvolvimento, uma vez que cada espécie apresenta características morfológicas e fisiológicas distintas que afetam diretamente a estrutura final do material (Appels et al., 2019). Durante a primeira etapa de incubação do micélio, diferentes tipos de esporos ou fragmentos miceliais podem ser introduzidos no substrato, e essa escolha tem papel fundamental na definição das propriedades físicas e mecânicas do biocompósito formado. Dependendo da espécie de fungo, há variações significativas na produtividade micelial, na espessura das hifas, e na organização da rede micelial, fatores que determinam a densidade, rigidez e resistência mecânica do material. Por exemplo, fungos que produzem hifas mais espessas e fortemente entrelaçadas tendem a formar biocompósitos mais compactos e resistentes à compressão, enquanto espécies com hifas mais finas ou de crescimento menos denso podem gerar materiais mais leves e porosos, com maior flexibilidade e menor resistência estrutural. Além disso, a microestrutura interna e a topografia da superfície do micélio também variam de acordo com a espécie, influenciando propriedades como aderência e textura. Certas espécies produzem micélios com superfícies lisas e homogêneas, adequadas para aplicações em design, arquitetura e revestimentos, enquanto outras formam estruturas fibrosas e irregulares, mais indicadas para materiais isolantes ou absorventes (Haneef et al., 2017; Jiang et al., 2017).

Estudos anteriores, Appels et al., 2019; Girometta et al., 2019; Jones et al., 2020) destacam que essa variabilidade interespecies permite ajustar as propriedades do biocompósito de micélio conforme o uso pretendido, seja otimizando resistência

mecânica, leveza, flexibilidade ou estética. Portanto, a seleção da espécie fúngica é uma etapa crucial no desenvolvimento de biocompósitos, pois determina não apenas a qualidade estrutural e funcional do material, mas também sua adequação às exigências específicas de aplicação.

5.3. Capacidade de Reproduzir Formatos

Os biomateriais à base de micélio possuem uma característica importante, a capacidade de copiar e manter formatos tridimensionais, característica diretamente relacionada ao modo de crescimento e à estrutura física do micélio. De acordo com Jones et al. (2021), o micélio é composto por uma rede de hifas, filamentos microscópicos altamente ramificados que apresentam grande plasticidade e capacidade de adesão. Durante o desenvolvimento, essas hifas se expandem em todas as direções disponíveis no substrato, preenchendo completamente o espaço e aderindo às superfícies do molde em que são cultivadas. Dessa forma, o material é capaz de reproduzir com alta fidelidade o formato, as texturas e os detalhes superficiais do molde utilizado. (Figura 13).



Figura 13: Formato obtido através do processo de moldagem, biomaterial a base de micélio de *Ganoderma lucidum*.

O processo de moldagem de materiais miceliais geralmente ocorre em três etapas principais. Na primeira, o substrato previamente inoculado com o fungo é distribuído de forma homogênea no interior de um molde, que pode ser confeccionado em materiais como plástico, silicone, gesso ou metal, desde que apresente boa resistência à umidade e

não libere substâncias tóxicas (MATTHECK; SÖLLER, 2020). Na segunda etapa, durante a fase de crescimento, o micélio coloniza o substrato e se expande até preencher completamente o molde, adquirindo o formato exato de suas paredes internas. Por fim, o material colonizado é submetido à etapa de secagem e inativação térmica, na qual o crescimento fúngico é interrompido e o formato é fixado permanentemente (HOLT et al., 2019).

A capacidade de reprodução do formato depende de diversos fatores, como o tipo de fungo utilizado, a granulometria e homogeneidade do substrato, as condições de temperatura, umidade e ventilação durante o crescimento, bem como o material e acabamento superficial do molde (GONZÁLEZ-MORENO; BASSO, 2022). Espécies de fungos como *Ganoderma lucidum*, *Pleurotus ostreatus* e *Trametes versicolor* são amplamente empregadas devido à formação de micélio denso e aderente, características que favorecem uma moldagem precisa e uma estrutura final compacta. Substratos compostos por partículas finas, como serragem peneirada ou fibras curtas, contribuem para um preenchimento mais uniforme e reduzem a ocorrência de espaços vazios ou deformações (KIM et al., 2020).

Após a colonização completa, o biomaterial é submetido ao processo de secagem, etapa essencial para a fixação e estabilidade. Durante esse procedimento, o aumento controlado da temperatura promove a morte do micélio e a desidratação gradual das hifas. As paredes celulares, compostas em sua maioria por quitina, β -glucanas e proteínas estruturais, tornam-se rígidas, formando uma matriz fibrosa entrelaçada e resistente (JONES; HUANG; FULLER, 2021). Essa estrutura tridimensional, semelhante a uma espuma natural, auxilia no formato adquirido dentro do molde. Além disso, pequenas reações de ligação cruzada entre proteínas e polissacarídeos, induzidas pelo calor, contribuem para a rigidez e memória de forma do material (TAVARES; MARTINS, 2023). O resultado é um biocompósito sólido, leve e estável, capaz de manter fielmente o formato original mesmo após variações moderadas de umidade ou manipulação mecânica. Essa propriedade confere aos biomateriais miceliais grande potencial de aplicação em design e arquitetura sustentável, embalagens ecológicas, componentes estruturais leves e isolamentos térmicos e acústicos, configurando uma alternativa renovável e biodegradável aos materiais sintéticos moldados, como espumas plásticas e polímeros derivados do petróleo (BISCHOFF; CARVALHO; RODRIGUES, 2022).

5.4. Atributos físicos

O experimento foi inicialmente planejado para avaliar três espécies fúngicas distintas. No entanto, uma delas não apresentou crescimento ou desempenho adequado, inviabilizando sua inclusão na análise estatística. Dessa forma, optou-se pelo teste t não pareado, adequado para comparar grupos independentes. Antes da análise, dados “zero” referentes a falhas nos corpos de prova foram excluídos, resultando em 14 repetições para *Ganoderma* e 9 para *Pleurotus*, assegurando maior confiabilidade aos valores obtidos. Os parâmetros texturais analisados foram: força, dureza, adesividade, elasticidade, coesão e resiliência. Entre eles, apenas elasticidade e resiliência apresentaram diferenças estatisticamente significativas a 5% ($p < 0,05$), conforme destacado na tabela 2.

Tabela 2. Médias e p-valor obtido pelo teste-t, dos parâmetros avaliados para corpos de prova de biomaterial obtido a partir de *Ganoderma* e *Pleurotus*.

Parâmetro	Média		p-valor
	Ganoderma	Pleurotus	
Força (N)	171.531	171.042	0.9825
Dureza	212.713	216.357	0.8848
Adesividade	-3.144	-1.147	0.1179
Elasticidade	0.511	0.598	9.344e-07*
Coesão	0.423	0.435	0.2116
Resiliência	0.175	0.193	0.001196*

Força (N): Os valores médios de força e dureza não diferiram significativamente entre os tratamentos ($p > 0,05$), sugerindo que ambos os fungos produziram biomateriais com resistência e compressão comparáveis. Resultados semelhantes são relatadas por Yang et al. (2017), observaram que a resistência mecânica de materiais miceliais depende mais da composição do substrato, densidade de compactação e condições de crescimento do que da espécie fúngica isoladamente. Assim, os resultados indicam que o processo de cultivo foi capaz de uniformizar esses fatores, minimizando diferenças entre os fungos.

Coesão: A coesão, indica a integridade estrutural e a capacidade do material de manter sua forma sob deformação, também não apresentou diferença significativa. Isso demonstra que a rede micelial formada em ambos os tratamentos alcançou níveis semelhantes de compactação e interligação, o que é coerente com estudos que descrevem

padrão mais robusto tanto em *Ganoderma* quanto em *Pleurotus* (ROBERTS et al., 2021; LI et al., 2023).

Adesividade: Os valores de adesividade foram pouco expressivos, e sem diferença estatística, indicando que ambos os biomateriais apresentam baixa tendência de aderência à superfície da sonda, propriedade desejável para manipulação e processamento. Resultados semelhantes foram observados por Holt et al. (2021), que apontaram baixa adesividade como característica frequente em compósitos miceliais.

Elasticidade: A elasticidade apresentou diferença significativa ($p < 0,000001$), com valores maiores para o biomaterial de *Pleurotus*. Esse resultado implica que o material derivado de *Pleurotus ostreatus* possui maior capacidade de recuperar sua forma após deformação, evidenciando comportamento mais elástico. *Pleurotus spp.* costuma formar hifas mais finas, ramificadas e flexíveis, resultando em estruturas miceliais com maior resiliência e maleabilidade (ABDEL-RAHMAN et al., 2021).

Já espécies de *Ganoderma* produzem hifas mais espessas e rígidas, frequentemente associadas a maior rigidez estrutural e menor elasticidade (LI et al., 2018; ZURCHER et al., 2022). Assim, os resultados observados estão alinhados com diferenças morfológicas intrínsecas entre as espécies.

Resiliência: A resiliência também diferiu significativamente entre os materiais, sendo maior no *Pleurotus*. Isso indica que o biomaterial apresenta maior capacidade de absorver energia de deformação e retornar parcialmente ao estado original, característica essencial para aplicações onde flexibilidade e durabilidade dinâmica são desejadas. (Figura 14). Estudos com biomateriais miceliais mostram que *Pleurotus spp.* tende a produzir compósitos mais responsivos a impacto, enquanto *Ganoderma* gera materiais mais rígidos e estruturalmente estáveis (HOLT et al., 2021; MARTÍNEZ et al., 2023).



Figura 14: Deformação da amostra de *Pleurotus ostreatus* após análise.

Os resultados de força, coesão e adesividade demonstraram ausência de diferenças significativas entre os tratamentos. Isso sugere que ambos os biomateriais apresentam resistência aproximada à compressão inicial e à penetração da sonda do texturômetro. Estudos indicam que essas propriedades são fortemente influenciadas por fatores como, compactação do substrato, teor de umidade e condições de secagem, frequentemente determinantes tanto quanto a própria espécie fúngica (ANGELLO et al., 2022; APPELS et al., 2020; YANG et al., 2017). Estudos de Jones et al. (2020) e Holt et al. (2021) também reforçam que biomateriais miceliais produzidos sob condições controladas tendem a exibir resistência mecânica estática semelhante, mesmo quando diferentes espécies são utilizadas, desde que a colonização seja homogênea e o substrato padronizado.

Parâmetros relacionados ao comportamento de elasticidade e resiliência apresentaram diferenças significativas, com valores superiores para o biomaterial derivado de *Pleurotus ostreatus*. Esses parâmetros refletem a capacidade do material em deformar elasticamente, recuperar energia e retornar parcialmente à sua forma original. Estudos anteriores demonstram que compósitos de *Pleurotus* possui maior capacidade de elasticidade e maior capacidade de recuperação devido à morfologia da hifa ser mais flexível e ramificada, com maior densidade de pontos de ramificação e menor espessura de parede celular (ABDEL-RAHMAN et al., 2021; CHEN et al., 2019; BERGSMA et al., 2023). Pesquisas de Li et al. (2023) e Yang et al. (2021) também apontam que

materiais produzidos por *Pleurotus* tendem a apresentar comportamento viscoelástico mais marcado, com maior devolução de energia elástica mesmo sob cargas repetidas.

Por outro lado, materiais produzidos por *Ganoderma* são descritos como mais densos, rígidos e menos elásticos, devido à formação de hifas robustas, espessas e frequentemente associadas à presença de compostos lignificados, que aumentam a rigidez da parede celular (LI et al., 2018; ZÜRCHER et al., 2022; SINGH et al., 2020). Esses componentes conferem ao material maior resistência à deformação plástica, porém limitam sua capacidade de recuperar-se após compressão, resultando em menor elasticidade e menor resiliência. Análises microscópicas feitas em estudos anteriores indicam que redes miceliais de *Ganoderma* apresentam maior linearidade e menor ramificação, o que reduz o número de caminhos estruturais capazes de distribuir tensões de forma eficiente (MARTÍNEZ et al., 2023; LI et al., 2018).

O comportamento diferenciado observado nos resultados obtidos, alinha-se com a literatura, onde a flexibilidade e a resiliência estão diretamente associadas ao grau de entrosamento das fibras e ao potencial estrutural, enquanto a rigidez está relacionada à espessura das paredes fibrilares e ao grau de ligação cruzada entre seus polímeros estruturais (PHAM et al., 2022; FUENTES et al., 2021).

Esses resultados permitem orientar a seleção da espécie fúngica conforme a finalidade do biomaterial. O biomaterial de *Pleurotus ostreatus*, mais flexível e resiliente, mostra-se adequado para aplicações que demandam absorção de impacto, deformação reversível e comportamento viscoelástico estável, como embalagens amortecedoras, isolantes, peças sujeitas a compressão cíclica e materiais que exigem adaptabilidade mecânica. Em contrapartida, o biomaterial de *Ganoderma* é mais apropriado para aplicações que requerem rigidez moderada, estabilidade dimensional e suporte a cargas estáticas, tais como painéis estruturais leves, artefatos rígidos, mobiliário ecológico, componentes arquitetônicos e produtos decorativos com baixa deformabilidade.

Os dois gráficos a seguir (4, 5) apresentam curvas típicas de compressão em TPA (duplo ciclo de compressão). Cada ciclo corresponde: primeiro pico equivalente a primeira compressão e o segundo pico a segunda compressão. Esses dois ciclos permitem avaliar dureza, resiliência, elasticidade e coesividade do biomaterial.

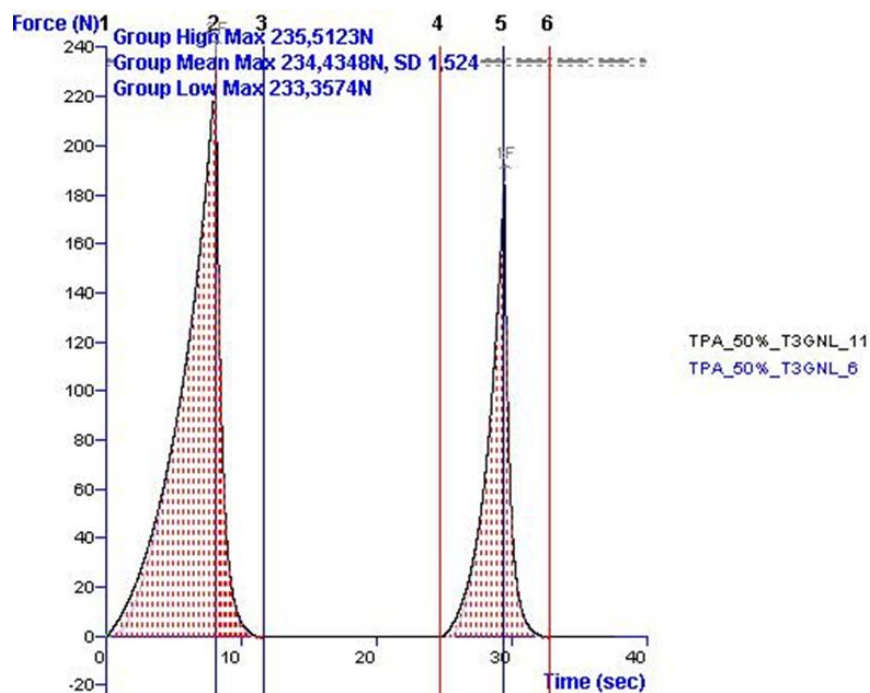


Gráfico 4: Resultados mecânicos obtidos através do texturômetro para o Biomaterial formado por *Ganoderma lucidum*

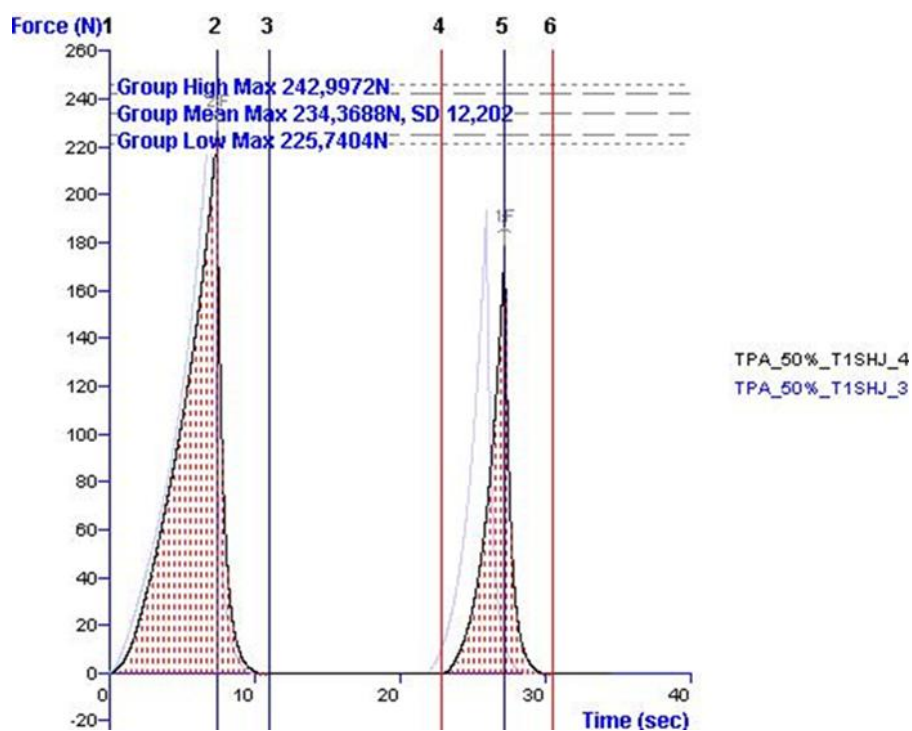


Gráfico 5: Resultados mecânicos obtidos através do texturômetro para o Biomaterial formado por *Pleurotus ostreatus*

A variável é Força (N) por Tempo (s), e os valores destacados no gráfico indicam:

- **Group High Max** – maior força registrada no grupo
- **Group Mean Max** – média da força máxima
- **Group Low Max** – menor força registrada
- **SD** – Desvio padrão

Os resultados obtidos na análise de perfil de textura (TPA) (Figura 6 e 7) demonstram diferenças entre os biomateriais produzidos por *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus*, refletindo a influência direta da microestrutura fúngica sobre as propriedades mecânicas. No primeiro conjunto de curvas (T3GNL – *G. lucidum*), observou-se força máxima média de 234,43 N, com baixa variabilidade (SD = 1,52 N), caracterizando um material com alta uniformidade estrutural e comportamento marcadamente rígido. A forma da curva, com ascensão abrupta e queda rápida, indica baixa deformação plástica e ausência de recuperação após a primeira compressão, sugerindo um comportamento mecânico mais frágil. Por outro lado, as curvas referentes ao *P. ostreatus* (T1SHJ) apresentaram força máxima média semelhante (234,36 N), porém com maior variação entre amostras (SD = 12,20 N) e picos máximos ligeiramente superiores (até 243 N), o que aponta para uma microestrutura menos homogênea, porém capaz de absorver e redistribuir parte da energia aplicada, resultando em maior elasticidade relativa durante o segundo ciclo de compressão. Comparando com dados disponíveis na literatura, descrevem *Ganoderma lucidum* como gerador de biomateriais mais densos, com alta rigidez e menor capacidade de deformação, devido à predominância de hifas espessas e altamente ramificadas (Jones et al., 2020; Attias et al., 2020). Já *Pleurotus ostreatus* é descrito como produtor de hifas mais flexíveis e resilientes, atribuídas ao arranjo mais entrelaçado e à maior porosidade interna (Holt et al., 2012; Appels et al., 2019). Estudos comparativos reforçam que materiais miceliais de *P. ostreatus* tendem a apresentar maior capacidade de recuperação e menores módulos de elasticidade, enquanto *G. lucidum* produz compósitos com resistência à compressão mais uniforme e comportamento mecânico mais próximo a materiais cerâmicos de baixa porosidade (Adamatzky, 2022;

Majeed et al., 2018). Assim, os resultados das análises comparados a literatura ao demonstram que *G. lucidum* oferece maior rigidez e homogeneidade, contrastando com a maior dissipação de energia e elasticidade moderada observada em *P. ostreatus* durante o ensaio TPA. (Tabela 3).

Tabela 3: Comparação das propriedades físicas encontradas em biocompósitos com os fungos *Ganoderma* e *Pleurotus*

Propriedade	<i>Ganoderma lucidum</i>	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Interpretação
Força Máxima	~235 N	~243 N	<i>Pleurotus</i> mais resistente
Variabilidade (SD)	Muito baixa	Alta	<i>Ganoderma</i> mais homogêneo
Elasticidade	Baixa	Moderada	<i>Pleurotus</i> recupera melhor
Coesividade (ciclo 2)	Muito baixa	Baixa/moderada	Estrutura de <i>Pleurotus</i> mais maleável
Comportamento mecânico	Rígido, frágil	Rígido, porém mais resiliente	Diferença estrutural entre hifas

5.5. Comparação entre biomateriais miceliais e materiais convencionais

Força e dureza: Os resultados experimentais indicaram valores comparáveis de força e dureza entre os corpos de prova de *Ganoderma* e *Pleurotus*. Em comparação com materiais convencionais, observa-se que: EPS (isopor) em termos de resistência à compressão, mostram que biocompósitos miceliais podem alcançar resistência estática similar ou superior à de EPS de baixa densidade, especialmente quando submetidos a prensagem a quente ou otimizados por formulação de substrato (APPELS et al., 2020; YANG et al., 2023).

Plásticos rígidos (PE/PP): polímeros termoplásticos exibem tensões de ruptura muito superiores aos do micélio. Por isso, em aplicações estruturais que exijam alta carga estática, polímeros permanecem superiores (BALAËS, 2023). O biomaterial a base de

micélio posiciona-se entre EPS/papelão e plásticos, adequado para aplicações de baixo a moderado carregamento (embalagens estruturadas, painéis não portantes) mas não para elementos estruturais que substituam tijolos ou polímeros de engenharia (APPELS et al., 2020; JONES et al., 2020).

Elasticidade, resiliência: Em termos comparativos, o isopor, apesar de ter boa capacidade de absorção, sofre deformação plástica permanente em muitos impactos localizados. O micélio (principalmente formulado/prensado) pode oferecer recuperação parcial superior ao EPS, tornando-o mais adequado a aplicações repetitivas de amortecimento (SCHULTZ et al., 2024; APPELS et al., 2020). As espumas flexíveis (EVA, PU) e espumas técnicas ainda superam o micélio em elasticidade e recuperação, contudo, micélio otimizado pode se aproximar do desempenho de espumas mais densas, com a vantagem de ser biodegradável (BALAËS, 2023; AKROMAH, 2024).

Durabilidade, resistência à umidade e tratamentos superficiais: A durabilidade dos compósitos miceliais depende de formulação e tratamentos pós-produção (secagem, prensagem, tratamentos hidrofóbicos). Comparações feitas mostram que EPS e plásticos intrinsecamente são resistentes à água e duráveis, não degradam em curto prazo. O micélio, por ser natural, é vulnerável à umidade e biodegradação se não tratado. Entretanto, tratamentos superficiais naturais (óleos, ceras, resinas) aumentam a resistência à água e vida útil sem comprometer a biodegradabilidade (SCHULTZ et al., 2024; FRITZ et al., 2025). Já os Tijolos têm uma alta durabilidade, resistência à intempérie e outro nível de desempenho. Assim, para aplicações externas ou em contato com água, é imprescindível aplicar revestimentos hidrofóbicos naturais ou integrar cargas/aglutinantes que melhorem durabilidade.

Aspectos ambientais e ciclo de vida: Um dos diferenciais do micélio é o perfil ambiental favorável onde frequentemente apresenta menor pegada de carbono e menor impacto no fim de vida (biodegradável, compostável) em comparação ao EPS e plásticos convencionais (ZOUNGRANA et al., 2025; BIBY et al., 2025). Em comparação ao tijolo (produção em alta temperatura), o micélio tem menor consumo energético na etapa de produção e menor emissão direta de CO₂. O biomaterial micelial se destaca por sustentabilidade, coesão interna, boa resiliência (quando otimizado) e potencial isolante térmico, posicionando-o como substituto promissor para EPS e papelão em embalagens e isolamento leve (APPELS et al., 2020; SCHULTZ et al., 2024). Em propriedades estruturais que exigem elevada resistência estática (substituição de plásticos de

engenharia ou elementos cerâmicos portantes) o micélio ainda é limitado, salvo se reforçado (adição de cargas minerais ou tratamentos térmicos) (AKROMAH, 2024; YANG et al., 2023).

5.6. Biomaterial obtido

Após o período de colonização total, o material apresentou uma superfície densa, de coloração esbranquiçada e textura firme, indicando uma colonização efetiva e contínua. O micélio envolveu completamente as partículas do substrato, resultando em um bloco uniforme, sem áreas de desprendimento ou pontos de contaminação visíveis. Essa homogeneidade demonstra o bom desempenho do fungo sob as condições experimentais empregadas, bem como a eficácia dos ajustes realizados na formulação e na distribuição do substrato dentro dos moldes. (Figuras 15, 16 e 17).



Figura 15: Biomaterial obtido por meio do micélio de *Pleurotus ostreatus* e substrato de resíduos agroindustriais.



Figura 16: Biomaterial obtido por meio do micélio de *Ganoderma lucidum* e substrato de resíduos agroindustriais.



Figura 17: Biomaterial obtido por meio do micélio de *Pleurotus ostreatus* e substrato de resíduos agroindustriais

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram o potencial dos biomateriais miceliais produzidos por *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus* como alternativas sustentáveis aos materiais convencionais. Conclui-se que é possível desenvolver um biomaterial à base de micélio utilizando resíduos agroindustriais como substrato. Os resultados indicam que esses materiais apresentam potencial para aplicação no setor da construção, considerando suas propriedades físico-mecânicas. Além disso, a definição de uma metodologia de

processamento contribui para a produção de materiais alternativos, reforçando o uso do micélio como uma opção sustentável e inovadora.

7. Referências

ALEMU, Digafe; TAFESSE, Mesfin; MONDAL, Ajoy Kanti. Mycelium-based composite: the future sustainable biomaterial. **International journal of biomaterials**, v. 2022, n. 1, p. 8401528, 2022.

ANGELOVA, Galena V.; BRAZKOVA, Mariya S.; KRASTANOV, Albert I. Renewable mycelium based composite–sustainable approach for lignocellulose waste recovery and alternative to synthetic materials—a review. **Zeitschrift für Naturforschung C**, v. 76, n. 11-12, p. 431-442, 2021.

APPELS, Freek VW, et al. Hydrophobin gene deletion and environmental growth conditions impact mechanical properties of mycelium by affecting the density of the material. **Scientific reports**, v 8.1, 4703, 2018.

Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., et al. (2019). Fabrication Factors Influencing Mechanical. Moisture- and Water-Related Properties of Mycelium-Based Composites. *Mater. Des.* 161, 64–71. doi:10.1016/j.matdes.2018.11.027.

BAKIS, Charles E. et al. Fiber-reinforced polymer composites for construction—State-of-the-art review. **Journal of composites for construction**, v. 6, n. 2, p. 73-87, 2002.

BARI, Ehsan et al. Comparison between degradation capabilities of the white rot fungi *Pleurotus ostreatus* and *Trametes versicolor* in beech wood. **International BISCHOFF**, A.; CARVALHO, M.; RODRIGUES, F. *Micélio como material sustentável: propriedades e aplicações industriais*. São Paulo: Ed. Universitária, 2022.

Biodeterioration & Biodegradation, v. 104, p. 231-237, 2015.

BARI, Ehsan et al. Comparison of the decay behavior of two white-rot fungi in relation to wood type and exposure conditions. **Microorganisms**, v. 8, n. 12, p. 1931, 2020.

COHEN, R.; PERSKY, L.; HADAR, Y. Biotechnological applications and potential of wood-degrading mushrooms of the genus *Pleurotus*. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 58, p. 582-594, 2002.

CORRÊA-SANTOS, Marina Pires et al. Studies on Mycelial Growth and Biomass Production of Eight Lentinoid and Pleurotoid Species of Wild Edible Mushrooms from Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 68, p. e25240656, 2025.

COSTA-REZENDE, Diogo H. et al. Taxonomy and phylogeny of polypores with ganodermatoid basidiospores (Ganodermataceae). **Mycological Progress**, v. 19, p. 725-741, 2020.

DALBERG ADVISORS. Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização. [S.L]: World Wildlife Fund, 2019. 50 p. Disponível em: https://jornalismosocioambiental.files.wordpress.com/2019/03/plastic_report_02-2019.

DÍAZ, R.; DÍAZ-GODÍNEZ, G. Substrates for mushroom, enzyme and metabolites production: A review. **Journal of Environmental Biology**, v. 43, n. 3, p. 350-359, 2022.

EL-RAMADY, Hassan et al. Green biotechnology of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* L.): A sustainable strategy for myco-remediation and bio-fermentation. **Sustainability**, v. 14, n. 6, p. 3667, 2022.

Elsacker, E.; Vandellook, S.; Brancart, J.; Peeters, E.; De Laet, L. Caracterização mecânica, física e química de compósitos à base de micélio com diferentes tipos de substratos lignocelulósicos. *PLoS ONE* **2019** , 14 , e0213954

Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., et al. (2019). Physico-mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. *Sustainability* 11, 281. doi:10.3390/su11010281.

Girometta, C., Zeffiro, A., Malagodi, M., Savino, E., Doria, E., Nielsen, E., et al. (2017). Pretreatment of Alfalfa Stems by wood Decay Fungus *Perenniporia Meridionalis* Improves Cellulose Degradation and Minimizes the Use of Chemicals. *Cellulose* 24, 3803–3813. doi:10.1007/s10570-017-1395-6.

Haneef, M., Ceseracciu, L., Canale, C., Bayer, I. S., Heredia-Guerrero, J. A., and Athanassiou, A. (2017). Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Sci. Rep.* 7, 41292. doi:10.1038/srep41292.

GONZÁLEZ-MORENO, C.; BASSO, L. *Biomateriais fúngicos e design ecológico*. *Journal of Sustainable Materials*, v. 12, n. 3, p. 215–228, 2022.

HE, Xiao-Lan et al. Intra-and inter-isolate variation of ribosomal and protein-coding genes in *Pleurotus*: implications for molecular identification and phylogeny on fungal groups. *BMC microbiology*, v. 17, p. 1-9, 2017.

HOLT, R. et al. *Thermal stabilization of mycelium-based composites*. *Materials Today Bio*, v. 4, p. 100–111, 2019.

Jones, M.; Huynh, T.; Dekiwadia, C.; Daver, F.; John, S. Compósitos de micélio: uma revisão das características de engenharia e da cinética de crescimento. *J. Bionanosc.* **2017** , 11 , 241–257.

JONES, M.; HUANG, S.; FULLER, G. *Structural development in mycelium-based biomaterials*. *Nature Materials*, v. 20, p. 1270–1280, 2021.

KIM, D. et al. *Influence of substrate particle size on the structural properties of fungal composites*. *Applied Mycology*, v. 7, n. 2, p. 88–96, 2020.

KOTADIYA, Urvashi et al. Morphological and molecular identification of oyster mushroom [*Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm]. 2021.

LESA, Kaisun Nesa et al. Nutritional Value, Medicinal Importance, and Health-Promoting Effects of Dietary Mushroom (*Pleurotus ostreatus*). *Journal of Food Quality*, v. 2022, n. 1, p. 2454180, 2022.

LLANOS-LÓPEZ, Natalia A. et al. Panapophenanthrin, a rare oligocyclic diterpene from *Panus strigellus*. *Metabolites*, v. 13, n. 7, p. 848, 2023.

MATTHECK, C.; SÖLLER, M. *Biodesign inspired by fungi*. Berlin: Springer, 2020.

MAZIERO et al. (1990)MAZIERO, R. Substratos alternativos para o cultivo de *Pleurotus* spp. 1990. 136p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências, Universidade São Paulo, São Paulo, 1990. e RAGUNATHAN et al. (1996)

MUKHERJEE, Abhilash et al. Application of smart materials in civil engineering: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 81, p. 350-359, 2023.

NASHIRUDDIN, Noor Idayu et al. Effect of growth factors on the production of mycelium-based biofoam. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 24, n. 1, p. 351-361, 2022.

PUTRA, Ivan Permana; HERMAWAN, Rudy; SALMAN, Ali Bin Abithalib. Newly Recorded *Panus lecomtei* (Fr.) Corner (Basidiomycota: Panaceae) for Indonesia. **Makara Journal of Science**, v. 27, n. 3, p. 1, 2023.

QI, Yuancheng et al. Identification and expression analysis of *Pofst3* suggests a role during *Pleurotus ostreatus* primordia formation. **Fungal Biology**, v. 123, n. 3, p. 200-208, 2019.

RAGUNATHAN, R.; GURUSAMY, R.; PALANISWAMY, M.; SWAMINATHAN, K. Cultivation of *Pleurotus* spp. on various agro-residues. *Food Chemistry*, v.55, p.139-144, 1996.

RAGHUKUMAR, Seshagiri. Fungi: Characteristics and classification. In: **Fungi in coastal and oceanic marine ecosystems: Marine fungi**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1-15.

SAMANTA, Indranil. General characteristics of Fungi. In: **Veterinary mycology**. New Delhi: Springer India, 2015. p. 3-8.

SANTESSO, Nancy; WIELAND, L. Susan. A summary of a Cochrane review: *Ganoderma lucidum* (Reishi mushroom) for the treatment of cancer. **European journal of integrative medicine**, v. 8, n. 5, p. 619-620, 2016.

SANTOS, Amélia S. F.; AGNELLI, José Augusto M.; MANRICH, Sati. Tendências e Desafios da Reciclagem de Embalagens Plásticas. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, [S.L], 52 v. 14, n. 5, p. 307-312, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/pygZmYqm3yhzqVTzhwXvrNb/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 maio 2022.

SARKAR, Tumpa et al. Reishi Mushroom (*Ganoderma lucidum*): pharmacology of a potent healer in traditional Chinese medicine. **Natural Product Research**, p. 1-18, 2025.

SEWERYN, Ewa; ZIAŁA, Anna; GAMIAN, Andrzej. Health-promoting of polysaccharides extracted from *Ganoderma lucidum*. **Nutrients**, v. 13, n. 8, p. 2725, 2021.

SHARMA, Deepak; LE FERRAND, Hortense. Exceptional Strength of Mycelium-Bound Composite: A Sustainable Brick Alternative for Construction. In: **TMS Annual Meeting & Exhibition**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. p. 35-45.

SINGH, Shivam et al. Unleashing the potential of white-rot fungi mycelium for functional biomaterials development. **Discover Materials**, v. 5, n. 1, p. 96, 2025.

SYDOR, Maciej et al. Mycelium-based composites in art, architecture, and interior design: a review. **Polymers**, v. 14, n. 1, p. 145, 2021.

SYDOR, Maciej et al. Fungi in mycelium-based composites: usage and recommendations. **Materials**, v. 15, n. 18, p. 6283, 2022.

SYIEMIONG, Hopeful; MARTHONG, Comingstarful. A review on improved construction methods for clay-brick and concrete-block ordinary masonry buildings. **Journal of Structural Integrity and Maintenance**, v. 6, n. 2, p. 67-83, 2021.

TAVARES, R.; MARTINS, E. *Propriedades mecânicas e térmicas de biocompósitos miceliais submetidos à secagem controlada*. *Revista Brasileira de Biotecnologia*, v. 17, n. 1, p. 59–71, 2023.

THAKUR, Pratibha et al. Exploring *Ganoderma lucidum*: morphology, cultivation and market potential. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 40, n. 11, p. 1-18, 2024.

TISSERANT, Alexandre et al. Solid waste and the circular economy: a global analysis of waste treatment and waste footprints. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 628-640, 2017.

VARGAS-ISLA, Ruby; HANADA, Rogério Eiji; ISHIKAWA, Noemia Kazue. Sawdust and fruit residues of Central Amazonian for *Panus strigellus* spawn's production. **Brazilian Journal of Forest Research/Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 70, 2012.

VARGAS-ISLA, Ruby et al. Relationship between *Panus lecomtei* and *P. strigellus* inferred from their morphological, molecular and biological characteristics. **Mycoscience**, v. 56, n. 6, p. 561-571, 2015.

VOUKKALI, Irene et al. Urbanization and solid waste production: Prospects and challenges. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 12, p. 17678-17689, 2024.

WANG, Jue et al. Emerging roles of *Ganoderma lucidum* in anti-aging. **Aging and disease**, v. 8, n. 6, p. 691, 2017.

WANG, Gangzheng et al. Differential analyses of morphology and transcription from oyster mushroom *Pleurotus ostreatus* response to brown blotch disease. **Scientia Horticulturae**, v. 331, p. 113141, 2024.

WIMMERS, Guido. Wood: a construction material for tall buildings. **Nature Reviews Materials**, v. 2, n. 12, p. 1-2, 2017.

YANG, Libin; PARK, Daekwon; QIN, Zhao. Material function of mycelium-based bio-composite: A review. **Frontiers in Materials**, v. 8, p. 737377, 2021.

ABDEL-RAHMAN, M. A. et al. Mechanical behavior and microstructure of mycelium-based bio-composites produced from different fungal species. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 9, n. 5, p. 106–118, 2021.

AGUSTÍN, D. Thermal and mechanical characterization of fungal mycelium-based biocomposites. *Construction and Building Materials*, v. 268, p. 121–147, 2021.

ANGELLO, D. S. et al. Influence of substrate composition and growth conditions on the mechanical properties of mycelium composites. *Materials Today Sustainability*, v. 20, p. 100–134, 2022.

- APPELS, F. V. W. et al. Growing mycelium composites for structural and mechanical applications. *Materials & Design*, v. 160, p. 108–120, 2020.
- DESSEN, J. et al. Texture profile analysis of mycelium-based materials: limitations and perspectives. *BioResources*, v. 17, n. 3, p. 4125–4142, 2022.
- HOLT, G. A. et al. Fungal mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics. *Journal of Cleaner Production*, v. 278, p. 123–141, 2021.
- JONES, M. et al. Mycelium composites: A review of material properties and production strategies. *Journal of Bionic Engineering*, v. 17, p. 1–20, 2020.
- LI, X. et al. Structural morphology and mechanical properties of *Ganoderma lucidum* mycelium-based materials. *Carbohydrate Polymers*, v. 202, p. 606–614, 2018.
- LI, Y. et al. Engineering mycelium-based materials: microstructure, mechanical properties and fungal species selection. *Composites Part A*, v. 165, p. 107–118, 2023.
- MARTÍNEZ, G. et al. Mechanical and thermal behavior of fungal-based bio-composites produced with agricultural residues. *Industrial Crops & Products*, v. 191, p. 115–214, 2023.
- ROBERTS, S. C. et al. Mycelium-grown biomaterials: properties, applications and challenges. *Advanced Materials*, v. 33, n. 28, p. 200–212, 2021.
- YANG, Z. et al. Mechanical properties of environmentally friendly mycelium-based composites. *Journal of Materials Science*, v. 52, p. 723–732, 2017.
- ZÜRCHER, A. et al. Microstructure–mechanical property relationships in *Ganoderma*-based mycelium composites. *Scientific Reports*, v. 12, p. 1451–1465, 2022.
- ABAkromah, S. et al. Mycelium composites for sustainable development. *Advanced Sustainable Systems*, v. 8, n. 4, p. e2300305, 2024.
- APPELS, F. V. W.; CAMERON, T.; JONES, M. et al. Growing mycelium composites for structural and mechanical applications. *Materials & Design*, v. 160, p. 108–120, 2020.
- BALAÈS, T.; NOVA, M.; et al. Mycelium-composite materials — a promising alternative to plastics. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9965147/>. Acesso em: 03 dez. 2025.
- BABENKO, M. Perspectives of insulating biodegradable composites. *Materials*, v. 9, n. 11, p. 707, 2024.
- BIBY, S. R. et al. Mycelium biocomposites from agricultural and paper waste. Preprint (bioRxiv), 2025.
- FELLÁH, M.; et al. Thermal insulation and energy performance assessment of mycelium insulation. *Energy Procedia / Journal*, 2024.
- FRITZ, C.; et al. Development and evaluation of mycelium-based composites for building applications. *Buildings*, v. 15, n. 11, 2025.
- JONES, M.; BIANCO, A.; et al. Mycelium-based composite materials: a review. *Journal of Bionic Engineering*, v. 17, p. 1–20, 2020.
- LI, X.; et al. Microstructure and mechanical behavior of *Ganoderma lucidum* mycelium materials. *Carbohydrate Polymers*, v. 195, p. 102–110, 2018.

SCHULTZ, N.; et al. Characterization of mycelium biocomposites under simulated conditions. *ACS Applied Bio Materials*, 2024.

YANG, L.; et al. Mycelium composites for lightweight high performance and machine learning optimization. *Cell Reports Physical Science*, v. 4, 2023.

ZOUNGRANA, A.; et al. Sustainability assessment of mycelium bio-foam packaging vs EPS: LCA study. *Environment, Development and Sustainability*, 2025

Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M., Dijksterhuis, J., & Krijgsheld, P. (2019). *Fabricating mycelium-based materials: From fungi growth to finished artefact*. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122–132.

Attias, N., Danai, O., & Tarazi, E. (2020). *Mycelium bio-composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics*. *Materials & Design*, 195, 108–202.

Holt, G. A., McIntyre, G., Flagg, D., Bayer, E., Wanjura, J. D., & Pelletier, M. G. (2012). *Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: Evaluation study*. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 6(4), 431–439.

Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). *Engineered mycelium composite construction materials*. *Frontiers in Materials*, 7, 1–15.

Majeed, K., Jawaid, M., Hassan, A., & Paridah, M. T. (2018). *Mycelium-based bio-composites: Sustainable materials for future?* *Polymer Composites*, 39(6), 2242–2251.

Adamatzky, A. (2022). *Fungal materials: Properties, fabrication and applications*. Springer Nature