

UFSCar – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CCET – CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

DQ – DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Breno Rampinelli Bozzo

**Compósitos Fúngicos: desenvolvimento de biomateriais a partir de
resíduos agroindustriais.**

Novembro de 2025

São Carlos - SP

Breno Rampinelli Bozzo

Compósitos Fúngicos: desenvolvimento de biomateriais a partir de resíduos agroindustriais.

Trabalho de conclusão de curso
apresentada ao Departamento de
Química da Universidade Federal de
São Carlos, para obtenção do título
de Bacharel em Química

Orientador(a): Dr. Edson Rodrigues Filho

Novembro de 2025

São Carlos - SP

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS****DEPARTAMENTO DE QUÍMICA - DQ/CCET/R**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905

Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 35/2025/DQ/CCET/R

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso**Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)****FOLHA DE APROVAÇÃO****BRENO RAMPINELLI BOZZO****COMPÓSITOS FÚNGICOS: DESENVOLVIMENTO DE BIOMATERIAIS A PARTIR DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS****Trabalho de Conclusão de Curso****Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos**

São Carlos, 01 de dezembro de 2025

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Prof. Dr. Edson Rodrigues Filho
Membro da Banca 1	Prof. Dr. Ricardo Samuel Schwab
Membro da Banca 2	Profa. Dra. Jéssica Cristina Amaral



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 01/12/2025, às 16:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **2090442** e o código CRC **2260851D**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.001933/2024-38

SEI nº 2090442

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Folha Aprovação, versão de 02/Agosto/2019

Agradecimento

Aos meus pais, Sergio e Eleni, pelo apoio emocional e financeiro ao longo de toda a graduação, onde o incentivo, apoio e a confiança foram essenciais para que eu superasse os desafios desse período e chegasse até a conclusão deste trabalho.

À minha irmã, Lívia, pelos conselhos, apoio e incentivo ao longo dessa trajetória, contribuindo para minhas decisões e para meu crescimento pessoal.

Ao meu orientador, Dr. Edson Rodrigues Filho, pela orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho, fundamental para sua condução e conclusão.

À Embrapa Instrumentação e Agropecuária, pela oportunidade de realização do estágio obrigatório, disponibilizando sua infraestrutura, essencial para o meu desenvolvimento profissional.

À Dra. Carolina Madazio Niro, pelos ensinamentos, dedicação e suporte durante o estágio, sendo peça fundamental no meu aprendizado.

Aos meus amigos da faculdade e aos meus amigos de São Paulo, pelo apoio, companheirismo e pela contribuição em tornar a trajetória acadêmica mais leve, descontraída e significativa.

À Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), ao Departamento de Química e a todos os professores, pela formação acadêmica de qualidade e pelo conhecimento transmitido ao longo da graduação.

Resumo

O aumento na produção de resíduos e subprodutos agroindustriais, assim como os seus impactos ambientais negativos fomentam a busca por alternativas sustentáveis em diversos setores, visando promover a economia circular e a busca por sustentabilidade. Assim, os compósitos fúngicos surgem como materiais muito relevantes neste cenário, já que utiliza-se do crescimento de fungos diretamente nos resíduos lignocelulósicos sem a necessidade de grandes tratamentos dos mesmos, transformando-os em materiais com grande valor agregado para que possam ser reintegrados à cadeia produtiva. O presente trabalho tem como objetivo a realização de uma revisão bibliográfica sobre os subprodutos, fungos, metodologias que são utilizadas para a produção destes materiais, assim como as propriedades físico químicas e o direcionamento a diferentes aplicações. As espécies estudadas foram *Pleurotus ostreatus*, *Ganoderma lucidum* e *Trametes versicolor*, e estão relacionadas ao grupo dos fungos de podridão branca possuem alta capacidade de degradar completamente estes substratos, tendo o foco direcionado a resíduos obtidos na produção agrícola brasileira.

Palavras-chave: compósitos fúngicos; resíduos agroindustriais; sustentabilidade; biomateriais.

Abstract

The increase in the generation of agro-industrial residues and by-products, as well as their negative environmental impacts, has driven the search for sustainable alternatives across different sectors, promoting circular economy principles and sustainability-oriented practices. In this context, fungal composites emerge as highly relevant materials, as they are produced through the direct growth of fungi on lignocellulosic residues without requiring extensive pre-treatments, transforming these wastes into high value-added materials that can be reintegrated into the productive chain. This study aims to conduct a bibliographic review on the by-products, fungal species, and methodologies employed in the production of these materials, as well as their physicochemical properties and the potential applications that can be derived from them. The analyzed species — *Pleurotus ostreatus*, *Ganoderma lucidum*, and *Trametes versicolor* — belong to the group of white-rot fungi due to their high capacity to completely degrade lignocellulosic substrates, with the focus directed toward residues generated by Brazilian agricultural production.

Keywords: fungal composites; mycelium; agro-industrial residues; sustainability; biomaterials.

Lista de Figuras

Figura 1 - Unidade polimérica da celulose.....	16
Figura 2 - Principais monossacarídeos constituintes da hemicelulose em plantas.....	16
Figura 3 - Estrutura representativa de um fragmento do polímero de lignina.....	17
Figura 4 - Comparação da composição e organização da parede celular de diferentes fungos patogênicos.....	19
Figura 5 – Compósitos fúngicos produzidos em moldes distintos.....	24
Figura 6 - Ciclo catalítico simplificado da LiP (A) e MnP (B); S = substrato aromático; FOH = substrato fenólico.....	28
Figura 7 - Ciclo catalítico das lacases; FOH = substrato fenólico.....	28
Figura 8 - Compósitos fúngicos em diferentes produtos.....	38

Lista de Esquemas

Esquema 1 – Tipos de enzimas envolvidas na degradação dos materiais lignocelulósicos.....	25
Esquema 2 – Fluxograma do método de produção padrão dos micélios.....	29
Esquema 3 – Fatores que afetam a funcionalidade e aplicação em diferentes áreas de produção do micélio.....	31

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Resíduos agrícolas e agroindustriais no Brasil e seus estados geradores.....	15
Tabela 2 – Composição típica de resíduos agrícolas e agroindustriais (base seca).....	15
Tabela 3 – Principais componentes da parede celular de fungos, suas unidades poliméricas e funções biológicas.....	20

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Espécies primárias de fungos utilizadas para a produção de compósitos fúngicos.....**26**

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Resíduos Agroindustriais	13
2.1.1	Tipos de Resíduos e Composição Lignocelulósica	16
2.2	Fungos	19
2.2.1	Micélio	23
3	COMPÓSITOS FÚNGICOS	25
3.1	ESPÉCIES FÚNGICAS UTILIZADAS	26
3.1.1	Potencial como Substrato	31
3.2	PROCESSOS DE PRODUÇÃO	32
3.2.1	Definição dos materiais	33
3.2.2	Preparação do Substrato	34
3.2.3	Inoculação e Incubação	35
3.2.4	Secagem	35
3.2.5	Tratamentos e alternativas de preparo	36
3.2.6	Propriedades dos Compósitos	36
4	APLICAÇÕES	39
4.1	VANTAGENS E DESVANTAGENS	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	41

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das atividades humanas mais antigas e essenciais, desempenhando papel fundamental na produção de matéria-prima utilizada em diversos insumos que são consumidos diariamente pela população, sendo estes submetidos a diferentes tipos de tratamentos ou processos que transformam consecutivamente o material em produtos comerciais. No entanto, estes processos geram resíduos e subprodutos em larga escala, cuja gestão adequada se tornou um dos grandes desafios ambientais da atualidade (Sydor, 2022).

Este problema pode ser apresentado através de estudos recentes, que estimam uma produção global anual de aproximadamente 140 gigatoneladas de biomassa no Brasil (AL, 2019), gerando então um impacto significativo aos ecossistemas relacionados. Este problema é amplificado quando tratamentos inadequados são aplicados a estes materiais, como a incineração, que é utilizada em cultivos agrícolas, como por exemplo a de cana de açúcar ou algodão (LIMA *et al.*, 2010). Esses métodos, além de não resolverem a questão do volume de resíduos, contribuem para o aumento de emissão de gases de efeito estufa (Lackner, 2025), intensificando problemas muito relevantes para o cenário global, como o aquecimento global.

No Brasil a agricultura é um forte agente econômico, representando cerca de 24% do produto interno bruto (PIB) (CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA); CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA), 2024), sendo considerada uma das principais atividades responsáveis pela geração de resíduos agroindustriais. Estudos estimam uma produção de 451 megatoneladas de resíduos agroindustriais por ano (JUNIOR, 2020), sendo estes gerados em monoculturas de produção de cana de açúcar, milho, soja ou café. A biomassa gerada é composta majoritariamente por celulose hemicelulose e lignina. No entanto, na maior parte dos casos esses materiais são destinados ao descarte ou à queima, sem que seu potencial seja adequadamente explorado.

A gestão inadequada desta biomassa gerada pode levar a um grande desperdício dos recursos presentes nestes materiais, justamente por estes terem um alto potencial de reinserção ao ciclo produtivo. A transformação de compostos residuais em novos produtos diminui os impactos negativos, mas também agrega muito valor a uma produção de materiais sustentáveis (LIMA *et al.*, 2010).

Na natureza, uma das formas de reintegrar os compostos a uma cadeia produtiva ocorre por agentes biológicos como os fungos e bactérias, que atuam como fator central na decomposição da matéria orgânica residual. Por meio de complexos enzimáticos, estes organismos são capazes de degradar materiais poliméricos como a celulose, hemicelulose e lignina gerando uma reciclagem de compostos e nutrientes, que possam a partir de então ser absorvidos por outros organismos.

Entre esses organismos, os fungos destacam-se pela sua alta capacidade de decompor materiais como a celulose e a lignina, sendo assim agentes essenciais na manutenção dos ecossistemas. Essa propriedade é resultado de uma produção de diferentes enzimas e da específica estrutura dos fungos, formada inicialmente por hifas, que são filamentos cilíndricos que, ao se entrelaçarem, formam uma rede complexa tridimensional conhecida como micélio (Jones, 2020). Este representa a parte vegetativa do fungo responsável pela sua dissipação no substrato, podendo-se desenvolver tanto em meios sólidos quanto líquidos, dependendo das características físico-químicas do material degradado (Sydor, 2020).

Os fungos são explorados principalmente para aplicações relacionadas à decomposição de materiais e à produção de metabólitos secundários, tendo funções importantes na indústria alimentícia (fermentação de bebidas e alimentos) e na produção de biocombustíveis, como o etanol (MÄKELÄ, 2014). Porém, avanços recentes na biotecnologia e na ciência dos materiais apresentam uma nova e diferente propriedade metabólica dos fungos, a sua capacidade não apenas de degradar compostos, mas também de sintetizar materiais a partir do crescimento e manipulação controlada do seu micélio.

Este novo paradigma é destacado em estudos como Sydor *et al.* (SYDOR, Maciej *et al.*, 2022), onde o potencial dos micélios de fungos é explorado para a criação de compósitos, ou seja, materiais explorados pela engenharia, que geram, através de duas fases diferentes, propriedades superiores às isoladas, assim os compósitos fúngicos retratam o crescimento dos fungos em substratos lignocelulósicos, os resíduos agrícolas de diversas fontes, onde os micélios, agregados de hifas, formam estruturas bem definidas, resistentes e biodegradáveis, cujas propriedades podem variar dependendo da espécie utilizada, como também de características físico-químicas do material utilizado como substrato, podendo gerar diferentes materiais, podendo um deles assumir propriedades similares ao poliestireno expandido (EPS),

popularmente conhecido como isopor, que é amplamente utilizado em diversos produtos, embalagens e revestimentos.

O biocompósito fúngico possui atributos importantes no contexto global atual, principalmente por ser biodegradável. Isso o diferencia dos plásticos comuns, que ao se degradarem produzem microplásticos capazes de causar impactos ambientais relevantes. E justamente pelas propriedades se assemelham a estes materiais já utilizados pela sociedade, a aplicação e o estudo destes materiais se apresentam como uma solução alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial a meta 12.5, que procura reduzir a geração de resíduos através da prevenção, redução, reciclagem e reutilização (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015).

O contexto situado então, reforça de maneira clara e objetiva a necessidade da busca por materiais alternativos e sustentáveis que possam substituir materiais com potencial danoso aos ecossistemas situados, sem alterar a qualidade e resistência dos materiais já utilizados. Assim, os fungos podem transformar resíduos e subprodutos de diferentes produções agroindustriais em materiais que retornam à cadeia produtiva de maneira eficaz e promissora.

Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica que aborda as diferentes tecnologias e metodologias utilizadas para a produção de compósitos fúngicos micelares. A revisão aborda variados substratos, resíduos e espécies fúngicas aplicáveis, destacando suas características específicas. O foco é voltado para materiais similares ao isopor, vantagens e limitações de cada técnica, alinhada a possíveis aplicações e práticas sustentáveis em que estes materiais possam ser implementados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Resíduos Agroindustriais

A diferença prática entre resíduos e subprodutos é apresentada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que os define como materiais secundários gerados durante um processamento industrial, onde dentre estes somente os subprodutos são os que possuem um

interesse maior associado à sua natureza. Um exemplo é a cana de açúcar, que após a extração de sua fração líquida, pode ter a sua biomassa direcionada para a geração de energia.

Dentre toda a produção agrícola mundial, destaca-se a produção de aproximadamente 140 gigatoneladas de insumos agrícolas, assim tornando mais clara a proporção do setor. Paralelo a este cenário, a geração de resíduos segue na mesma proporção, onde se estima uma produção de resíduos de 15 a 50 % deste montante. Esses resíduos são simplesmente descartados como materiais de baixo interesse industrial, abrangendo materiais como restos de colheita, rejeitos e subprodutos como um todo (TRIPATHI *et al.*, 2019). Assim, a falta de alternativas relevantes à indústria se apresenta como uma necessidade ou limitação do setor em direcionar ou reaproveitar estes materiais de forma eficiente e prática.

O problema se estende a todos os países do mundo, tendo uma concentração maior nos grandes produtores agrícolas, dentre eles a China, os Estados Unidos, a Índia e o Brasil, que são os maiores do ramo. A indústria agrícola brasileira é responsável por transformar matérias primas como trigo, soja, milho, entre outros, em diferentes materiais, podendo envolver diferentes processos e tratamentos desse material primário a uma cadeia produtiva extensa e complexa. Porém, durante todo o processo, diferentes subprodutos e resíduos são gerados, assim por ano, é estimada uma produção de 291 milhões de toneladas de materiais residuais (Siqueira *et al.*, 2022), que possuem diferentes propriedades, que vão desde o estado físico, como sólidos, líquidos e gases, até o nível de periculosidade do material. Seguindo este conceito, cada tipo de matéria-prima, utilizada para diversos processos diferentes, é responsável por tipos de subprodutos distintos, como apresentado na Tabela 1, esta classificação leva em consideração o tipo de planta utilizada ou mesmo de qual parte da sua estrutura que é de interesse para o devido processamento, assim como também a quantidade de resíduo produzida por ano para cada resíduo. Portanto, se mantém claro a necessidade do desenvolvimento de alternativas práticas e versáteis, que consigam ser utilizadas em diferentes tipos de materiais, de forma inovadora e sustentável.

Além de serem ponto de partida para a produção de materiais nocivos ao meio ambiente, podem ser grandes aliados a conceitos como a economia circular, que deixam de ser materiais secundários, mas também geram valor associado a reintegração destes à cadeia produtiva (JUNIOR, 2020). Pode-se apresentar a aplicação destes conceitos em produções

agrícolas que os utilizam, como na cana-de-açúcar, que, após a extração de sua fração de interesse, direciona o bagaço da cana para a geração de energia, assim reintegrando um subproduto da sua produção a cadeia, que pode ser aproveitado através da energia gerada (SCHMIDELL *et al.*, 2019). Outro exemplo se dá pelo reaproveitamento de palha de arroz, casca de coco, sabugo de milho e serragem, que são utilizados como matéria prima da produção de diferentes materiais, incluindo substrato para fermentação (SILVA *et al.*, 2018). Pesquisas indicam que cerca de 25 % da produção agrícola global se perde ao longo da cadeia, representando também desperdício de água, solo e insumos. Reduzir pela metade essas perdas poderia alimentar até um bilhão de pessoas (TRIPATHI *et al.*, 2019).

No cenário atual, os resíduos gerados são em grande parte manejados de maneira inadequada, onde são normalmente direcionados para tratamentos tradicionais, como a incineração e deposição no solo, que apesar de terem seus benefícios comerciais como a facilidade em reduzir a quantidade de material e reintegrar o carbono e outros compostos ao solo, atuam como agentes ambientalmente problemáticos, como a produção de gases que atuam no efeito estufa, contribuindo para ao todo para o aquecimento global (LIMA *et al.*, 2010; KUMAR; JOSHI, 2019). Assim, tratamentos paralelos podem ser realizados com a finalidade de reutilizar estes materiais residuais, como a produção de fertilizantes, biogás e compostagem, que são alternativas muito atrativas, porém o custo de tempo ou de dinheiro muitas vezes torna este tipo de tratamento inviável (TRIPATHI *et al.*, 2019; LACKNER; BESHARATI, 2025).

Na Tabela 1 pode-se observar a produção de resíduos em cada cultura, assim como os diferentes tipos de resíduos por plantaço, que podem ser gerados por diferentes processos ou etapas diferentes de toda a cadeia de produção de insumos. Outra informação explorada pela tabela, é da variação de cultivo das monoculturas nos estados brasileiros, mostrando então a diversidade de cultivos mas também de composição geográfica referente ao setor agrícola no Brasil.

Tabela 1 – Resíduos agrícolas e agroindustriais no Brasil e seus estados geradores.

Cultura	Resíduos (Mt/ano)	Principais tipos	Principais estados
Soja	60	Palha, vagens, casca do grão	Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul
Milho	50-60	Palha, sabugo	Paraná, Minas Gerais, Goiás
Cana de Açúcar	201	Bagaço, palha, torta, vinhaça	São Paulo, Goiás, Minas Gerais
Café	1,5-2	Casca e polpa	Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo
Algodão	3,7	Caroço, casca e torta	Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso do Sul Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Minas Gerais
Arroz	2,2-2,4	Casca e palha	Gerais

Fonte: (EMBRAPA, 2010; IPEA, 2012; CONAB, 2021)

2.1.1 Tipos de Resíduos e Composição Lignocelulósica

A composição de toda biomassa residual gerada, por se tratar de materiais provenientes de plantas, envolve diferentes proporções de celulose, hemicelulose, lignina, entre outros componentes que são utilizados como redes biológicas para a estruturação das plantas na natureza, onde diferentes subprodutos agrícolas podem apresentar distintas composições lignocelulósicas, as quais são apresentadas na tabela 2 (EMBRAPA, 2021 ; Elsacker, 2019).

Tabela 2 – Composição típica de resíduos agrícolas e agroindustriais (base seca).

Resíduo	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
Bagaço de cana	40–50	25–35	18–25
Palha de cana	35–45	25–30	20–25
Palha de trigo	33–40	20–25	15–20
Palha de milho	35–40	25–30	15–20
Casca de arroz	25–35	18–21	26–31
Casca de soja	30–35	20–25	20–25
Casca de café	30–35	25–30	20–25
Serragem (euc./pinus)	40–45	25–30	25–30

Fonte: Adaptado de Elsacker *et al.* (2019); Jones *et al.* (2020); Tripathi *et al.* (2019); Zhang *et al.* (2022); Embrapa (2021).

A celulose, polímero estrutural de diversas plantas, é uma das moléculas orgânicas mais abundantes presentes no ambiente terrestre, na qual se caracteriza por um polímero estrutural homogêneo, que varia de centenas até mais de 10.000 monômeros de glicose presentes em sua cadeia, as quais são conectadas entre si por ligações Beta (1,4), com ligações de hidrogênio entre as suas cadeias lineares, que formam microfibrilas, que em maior escala se denominam fibrilas, e conseqüentemente em fibras, que se caracterizam por sua alta resistência (KLEMM *et al.*, 2005; HON; SHIRAIISHI, 2001). A unidade polimérica de glicose é apresentada pela figura 2.

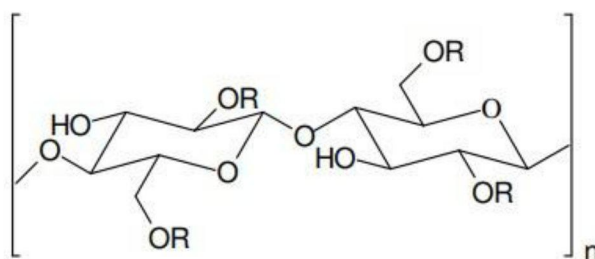


Figura 1 – Unidade polimérica da celulose. Adaptado de Lima Neto e Petrovick (1997).

A hemicelulose por sua vez se caracteriza por um polissacarídeo heterogêneo de baixa polimerização, constituída por 100 a 200 monômeros de glicose, xilose, manose, galactose, arabinose e ácidos urônicos, como apresentados pela figura 3, onde pode-se compreender as pequenas diferenças estruturais das diferentes unidades poliméricas, que são conectadas entre si por meio de ligações Beta(1,4), resultando em estruturas tridimensionais, que estão principalmente relacionadas à parede celular vegetal, e interagem por ligações de hidrogênio com a celulose, relacionada a aproximação das microfibrilas da celulose, e ligação covalente com a lignina (SJÖSTRÖM, 1993).

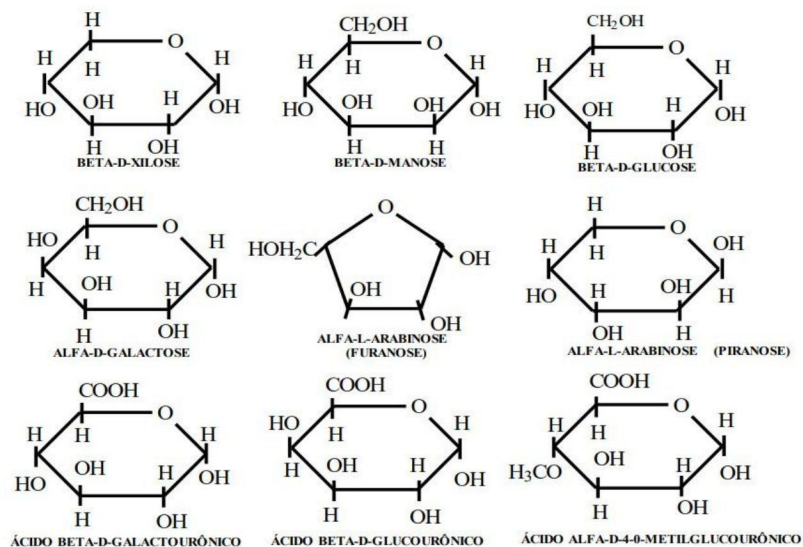


Figura 2 – Principais monossacarídeos constituintes da hemicelulose em plantas: pentoses, hexoses, ácidos hexurônicos e desoxiexoses. Adaptado de Ogata (2013).

A lignina, uma das principais moléculas de interesse deste trabalho, se caracteriza como um biopolímero heterogêneo, formada por monômeros aromáticos de *p*-coumaril, coniferil e sinapil, que são apresentados através de uma simulação de um fragmento da lignina, tornando clara a visualização dos anéis aromáticos e dos grupos fenóis presentes em toda a molécula, sendo responsáveis pela rigidez e preenchimento de todas os espaços entre a celulose e hemicelulose através da parede celular (BOERJAN; RALPH; BAUCHER, 2003). Diferentes regiões da planta, assim como espécies e tipos de madeira podem variar muito a proporção de cada unidade polimérica presente na estrutura química da lignina, além disso a sua estrutura pode conferir a hidrofobicidade e resistência da planta a enzimas e patógenos, isso por ser formada por meros aromáticos que podem atuar como uma barreira de degradação para as enzimas de patógenos (WONG, 2009).

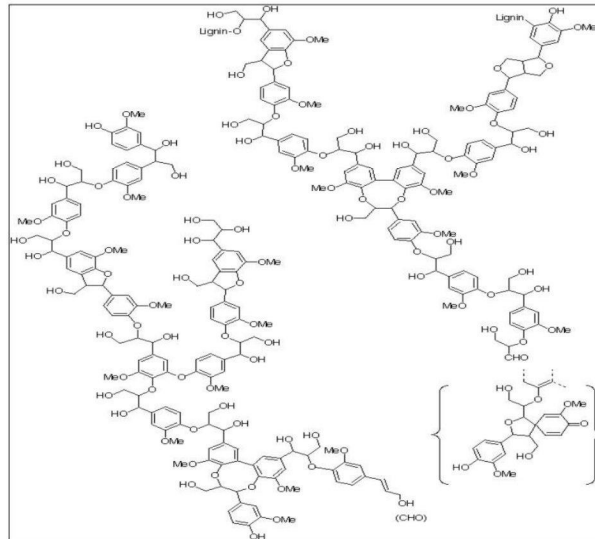


Figura 3— Estrutura representativa de um fragmento do polímero de lignina. Adaptado de Sjöström (1993) apud Klock (2006).

2.2 Fungos

Os fungos fazem parte do grupo de organismos eucariotos, abrangendo uma vasta gama de organismos que incluem as leveduras, bolores e cogumelos, sendo seres heterotróficos por absorção, assim se diferenciando das plantas devido a sua capacidade de se alimentar através do ambiente no qual se situa, este fenômeno ocorre através da capacidade dos fungos de degradar matéria orgânica através da secreção de enzimas digestivas, que degradam os compostos ao lado externo de sua estrutura, e os produtos obtidos são então absorvidos pela sua superfície. Esta capacidade de degradação permite a adaptação destes seres a maioria dos ecossistemas, fazendo que estes sejam os principais responsáveis por reciclar os compostos orgânicos na natureza (SYDOR, Maciej *et al.*, 2022)(DEACON, 2006). O número de espécies relacionadas a este reino é muito grande, onde foram catalogadas até o ano de 2017, cerca de 150 mil espécies, tendo em uma estimativa da existência de aproximadamente 3 milhões de espécies existentes em todo o mundo (SYDOR, Malgorzata *et al.*, 2021). Além de sua habilidade de degradação dos compostos orgânicos, eles também podem estar associados a uma série de relacionamentos simbióticos, como os presentes em raízes de plantas, que degradam compostos do solo, que permitem uma maior absorção destes sais pelas plantas e, em consequência, recebem carboidratos que os nutrem (HANEEF *et al.*, 2023).

Ao setor econômico, estes organismos também se apresentam como agentes importantes, sendo utilizados na indústria alimentícia através de fermentações de pães, cervejas e queijos, assim como na farmacologia por meio da produção de antibióticos como a penicilina (SYDOR, Malgorzata *et al.*, 2021). Com o passar do tempo, diversos estudos utilizam os fungos em setores diferentes como alternativas sustentáveis para diferentes aplicações, entre elas a obtenção de produtos bioativos, aditivos alimentares, pigmentos, biocombustíveis e até em fertilizantes. Basicamente, estes organismos são utilizados pela indústria por sua habilidade de reciclar ou transformar muitos compostos de forma sustentável (ELSACKER *et al.*, 2020).

Dentre as características dos fungos, tem-se a organização eucariótica tradicional, porém com a parede celular rígida, na qual a sua composição pode variar dependendo da espécie situada, mas principalmente composta por quitina, um polímero natural formado por n-acetilglicosamina e betaglucanas, que se associam a diferentes glicoproteínas, responsáveis por grande parte das atividades inerentes a cada espécie (GOW; LATGÉ; MUNRO, 2017). Dentre as atividades relacionada a parede celular pode-se citar a barreira osmótica, que previne a perda de água para o ambiente, a seletividade de entrada e saída de compostos, a qual atua como um filtro que apenas permite a passagem de substâncias que estão relacionadas ao metabolismo na qual o organismo se adaptou. Esta característica única dos fungos, é responsável por muitas das propriedades que são conferidas aos fungos, isto por cada espécie estar adaptada evolutivamente a diferentes ambientes e substratos, assim apresentando diferentes mecanismos de reconhecimento do substrato, defesa no reconhecimento biológico em hospedeiros, entre outras funções, que podem conferir a cada fungo, habilidades e características únicas.

Os fungos pluricelulares têm a sua estrutura composta por hifas, que são filamentos tubulares, que funcionam como o esqueleto de todo o organismo. Estes filamentos, dependendo da espécie, podem possuir algumas características, como o tipo de ramificação, atividade bioquímica ou fisiológica como um todo, mas em geral são organismos crescidos através de esporos, estruturas geradas através da reprodução sexuada ou assexuada dos fungos (GOW; GADD, 1995; KHAN, 2025). Estas ramificações são responsáveis pela eficiência destes seres, e estão presentes em todo o corpo vegetativo do fungo, sendo responsáveis pela formação de uma estrutura tridimensional denominada micélio, que está interconectada com

o substrato associado durante a sua extensão, assim atuando como uma tubulação que permite a fluidez de água, nutrientes e sinalizações metabólicas através de toda a sua colônia (GOW; LATGÉ; MUNRO, 2017). O micélio pode se adaptar à disponibilidade de água e nutrientes do substrato colonizado, moldando a sua estrutura para a sua máxima eficiência. Vale ressaltar que os corpos de frutificação dos fungos, os cogumelos, são formados por hifas especializadas, que possuem a função estrita à produção e disseminação de esporos (KHAN, 2025).

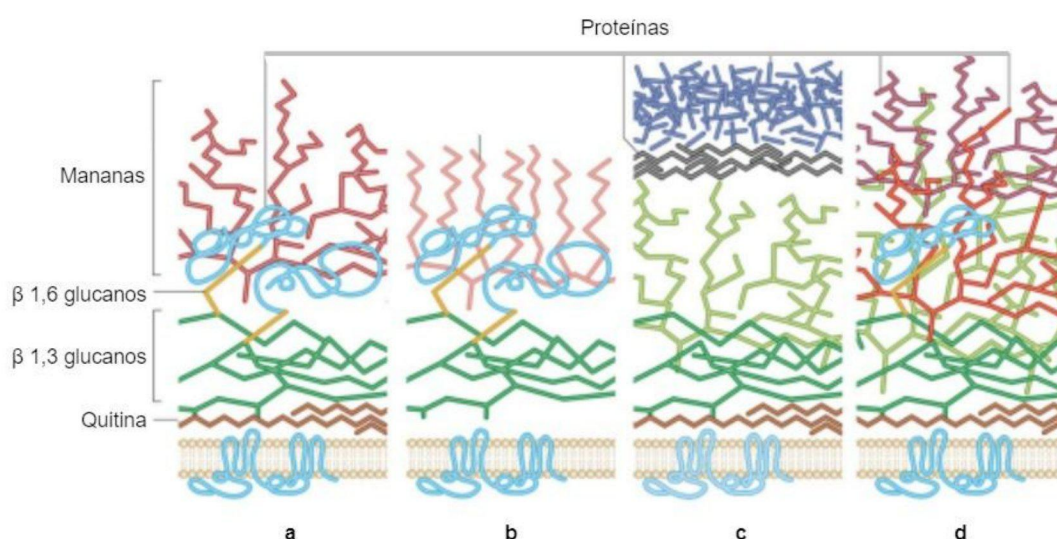


Figura 4 – Comparação da composição e organização da parede celular de diferentes fungos patogênicos: (a) *Candida* spp.; (b) *Pneumocystis* spp.; (c) *Aspergillus* conídios; (d) hifas de *Aspergillus fumigatus*. Adaptado de Gow, Latgé e Munro (2017).

A Figura 4 apresenta a comparação estrutural da parede celular de quatro formas fúngicas de relevância médica. Em *Candida* (a), observa-se uma parede composta por camadas organizadas de mananos associados a proteínas, β-glucanos e quitina, conferindo flexibilidade e capacidade de adaptação ao ambiente do hospedeiro. *Pneumocystis* (b) exibe uma arquitetura distinta, caracterizada pela predominância de β-1,3-glucanos e pela falta de quitina, além da presença de glicoproteínas na superfície, que são responsáveis pela adesão e pelo mascaramento antigênico. No conídio de *Aspergillus* (c), a superfície é recoberta por uma densa camada de rodlets formados por hidrofobinas, frequentemente associados à melanina, criando uma barreira que aumenta a resistência a estresses ambientais e imunes. Por fim, em *Aspergillus fumigatus* (d), a parede celular apresenta camadas internas compostas

majoritariamente por β -glucanos e quitina, organizadas sob a cobertura externa característica dos conídios, refletindo uma estrutura robusta que contribui tanto para a sobrevivência quanto para a infectividade da espécie. Na tabela 3, pode-se verificar as principais funções dos componentes presentes nas estruturas externas à parede celular dos fungos, apresentadas pela figura anterior.

Tabela 3 – Principais componentes da parede celular de fungos, suas unidades poliméricas e funções biológicas.

Componente	Unidades poliméricas	Funções principais
Quitina	<i>N</i> -acetilglicosamina (β -1,4)	Rigidez estrutural, resistência mecânica e proteção contra lise osmótica.
β -1,3-glucano	Glicose (β -1,3)	Principal polímero estrutural; forma rede de fibras que garante integridade, suporte e manutenção da forma celular.
β -1,6-glucano	Glicose (β -1,6)	Conecta β -1,3-glucanos e glicoproteínas, conferindo flexibilidade e remodelagem à parede.
Mananas Galactomananas	/Manose e galactose	Adesão celular, reconhecimento de hospedeiros e evasão imunológica.
Glicoproteínas	Cadeias de proteínas e oligossacarídeos	Adesão, permeabilidade e remodelagem da parede; incluem enzimas como quitinases e glucanases.
Melanina	Polímeros fenólicos derivados de DHN ou <i>L</i> -DOPA	Proteção contra radiação UV, estresse oxidativo e agentes antifúngicos.
Proteínas estruturais (ex.: anfífilas hidrofobinas)	Pequenas proteínas	Organização tridimensional da parede e confere hidrofobicidade e dispersão dos esporos.

Fonte: Adaptado de Gow, Latgé e Munro (2017); Latgé (2007); Free (2013).

A alimentação destes organismos acontece por meio da degradação de matéria orgânica independente da sua natureza (animal ou vegetal). A decomposição, de polímeros estruturais como a celulose, queratina ou outras estruturas ocorre através de enzimas, que são secretadas na superfície das hifas que estão em contato com o substrato, transformando os polímeros em substâncias menores que podem ser absorvidos pelo organismo fúngico que realiza o metabolismo destes compostos para nutrição de suas estruturas, reciclando assim todo o material orgânico morto, assim como nitrogênio, fósforo e enxofre dentre outras (ROTHSCHILD *et al.*, 2019).

Os fungos também se dividem em diferentes classes de acordo com algumas características individuais, entre elas Ascomycota, Basidiomycota, Zigomicota e Quitridiomicota. A divisão de interesse neste trabalho é dos Basidiomycota, que possuem características únicas de produção de um corpo frutífero externo, conhecido como cogumelos, além da capacidade de alguns fungos desta classe de decompor completamente estruturas mais rígidas, como a lignina, no caso dos fungos de podridão branca.

2.2.1 Micélio

As hifas, principal estrutura do fungo, é uma estrutura filamentosa cilíndrica que se ramifica de diferentes formas, gerando estruturas tridimensionais únicas e complexas (DEACON, 2006), formadas através de toda a extensão do material em decomposição relacionado. Esta complexa formação é denominada micélio fúngico, que pode ser definido como um aglomerado de hifas que, em conjunto formam uma estrutura macroscópica semelhante a uma teia. Por apresentar baixa espessura, o micélio é altamente eficiente em penetrar os poros microscópicos do substrato colonizado, o que facilita a degradação da matéria orgânica (ELSACKER *et al.*, 2020; GOW; LATGÉ; MUNRO, 2017), sendo utilizado como meio de transferência de diversos nutrientes, água e metabólitos durante toda a extensão de sua estrutura. Seu formato e características físico-químicas vão depender do substrato ao qual está associado, possuindo diferentes formatos e estruturas de acordo com a densidade, potencial nutritivo, porosidade e proporção deste (JONES *et al.*, 2020; SYDOR, Malgorzata *et al.*, 2021).

A estrutura do micélio pode ser encontrada de duas maneiras: a vegetativa, cuja função é colonizar toda a extensão do substrato situado e conseqüentemente a degradação

enzimática do mesmo, e a aérea, cuja função está relacionada a produção de esporos, podendo ou não gerar estruturas denominadas de corpos frutíferos, com a finalidade de disseminar esporos para a perpetuação de sua espécie (DEACON, 2006; SYDOR, Malgorzata *et al.*, 2021).

3 COMPÓSITOS FÚNGICOS

A definição de compósito se dá pelo desenvolvimento de um material que envolve duas ou mais fases, gerando uma estrutura heterogênea, na qual as propriedades dos materiais em conjunto se apresentam de forma superior ou distinta das propriedades isoladas de cada composto isolado (HSISSOU *et al.*, 2021). Na engenharia, este tipo de material é muito utilizado através de misturas entre cerâmica, polímeros ou metais e as partículas dispersas podem ser de diferentes tipos, como grânulos, fibras, entre outros (EGBO *et al.*, 2021). A função prática de desenvolver este tipo de compósito se dá através da melhoria significativa das propriedades físicas, químicas ou mecânicas observadas após a mistura de seus componentes, assim podendo ser utilizadas em diversos setores de engenharia, assim, é possível empregar compósitos produzidos a partir de materiais mais acessíveis de fontes naturais e, ainda assim, alcançar desempenho compatível com opções de maior custo, como resinas epóxi reforçadas com fibras de vidro ou carbono, amplamente utilizadas em aplicações que exigem durabilidade e elevada resistência mecânica (HSISSOU *et al.*, 2021).

Os compósitos fúngicos utilizam dois ou mais tipos de fases diferentes, o substrato, que é composto por diferentes materiais lignocelulósicos, como serragem, bagaços, cascas de frutos, entre outros, que podem ser utilizados de forma isolada ou combinada. Já a segunda fase é formada pelo micélio do fungo que crescerá no substrato, gerando ao final de todo o processo uma estrutura composta por micélio fúngico e substrato, que pode ser empregada em diversas áreas da indústria, de acordo com as propriedades oferecidas pelo material (HSISSOU *et al.*, 2021).



Figura 5: Compósitos fúngicos produzidos em moldes distintos. Retirado de Sydor, 2022.

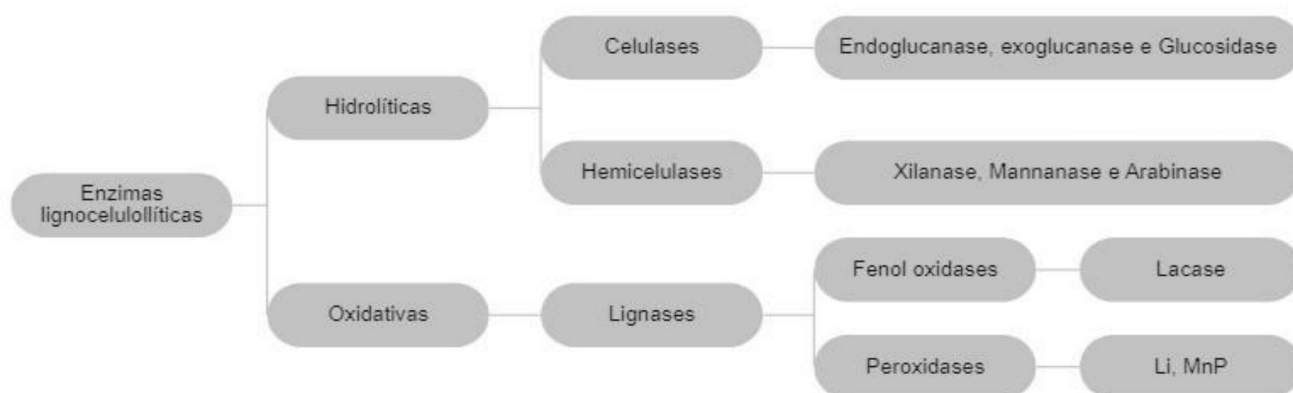
Os fungos, ao serem inoculados a um substrato, seguindo de uma sequência de procedimentos, que serão abordados posteriormente, utilizam da excreção de enzimas digestivas. Estas, que ao entrarem em contato com o substrato, conseguem degradar e despolimerizar todos os compostos lignocelulósicos, de maneira individual, onde a absorção destes compostos permite o crescimento de suas hifas em larga escala. O tempo de toda a degradação do substrato, assim como as propriedades dos materiais formados, depende das características dos fungos e substratos utilizados. É possível manipular as condições de cultivo para a obtenção de um material com especificações definidas. Dentre as características do material formado, a densidade do compósito formado está relacionada diretamente com a capacidade do fungo de se imergir no substrato (ELSACKER *et al.*, 2020).

3.1 ESPÉCIES FÚNGICAS UTILIZADAS

No reino Fungi, assim como na classe dos basidiomicetos, existem uma enorme variedade de espécies presentes, onde muitas delas estão relacionadas a diferentes meios de colonização, ou seja, substratos e ecossistemas muito diferentes, o que implica não só na estrutura do fungo, mas também nas capacidades enzimáticas e todo o seu metabolismo. Para a degradação de materiais lignocelulósicos, têm-se algumas espécies que são relacionadas, estas que já são utilizadas em certas pesquisas para a produção dos compósitos fúngicos. Vale

ressaltar que as espécies descritas neste trabalho não são as únicas capazes de ser utilizadas para a produção de compósitos, mas sim as que foram mais utilizadas em pesquisas e desenvolvimentos de materiais na literatura atual, assim como no desenvolvimento de patentes para diversas aplicações diferentes. Dentre as diferentes espécies estudadas, podem ser apresentadas em um grupo específico de fungos, os fungos de podridão branca. Estes fungos são capazes de degradar matéria orgânica, mas sua característica mais importante é a sua capacidade única de degradação de lignina.

No esquema 1 é possível identificar a diferenciação das enzimas envolvidas na degradação da estrutura lignocelulósica dos subprodutos colonizados pelos fungos onde as enzimas se dividem em hidrolíticas ou oxidativas, sendo as hidrolíticas a classe de enzimas presentes em praticamente todos os fungos que degradam estes tipos de estruturas lignocelulósicas, já as oxidativas são de exclusividade dos fungos de podridão branca, que está associada a presença de enzimas que degradam a lignina por meio de dois diferentes mecanismos, utilizando os ciclos catalíticos referentes a dois tipos de enzimas, as peroxidases e as lacases.



Esquema 1 – Tipos de enzimas envolvidas na degradação dos materiais lignocelulósicos. Adaptado de (KUMLA *et al.*, 2020)

Dentre as espécies utilizadas na produção dos compósitos fúngicos, 70 espécies são apresentadas, onde se dividem em quatro grupos diferentes, os fungos de podridão branca, fungos de podridão marrom, fungos de podridão mole, e por fim alguns fungos que provavelmente são de podridão branca mas não foram especificados por (Sydor *et al.*, 2021). Dentre estes, 47 das espécies descritas são fungos de podridão branca, 5 de podridão mole, 4 de podridão marrom, e apenas um que não foi especificado. Dentre as três espécies mais

citadas tem-se a *Trametes versicolor* (12), *Ganoderma lucidum* (21) e *Pleurotus ostreatus* (36) como as mais citadas. O estudo também contempla na sua contagem, diferentes combinações de espécies diferentes no seu substrato. Outro estudo que pode ser citado para a constatação das evidências constatadas anteriormente, foi realizado por Aiduang *et al.*, constatou que em 47 estudos, os gêneros de fungos mais utilizados para a criação dos compósitos foram *Pleurotus* (25.0 %), seguido de *Ganoderma* (22.2%) e *Trametes* (18.1 %).

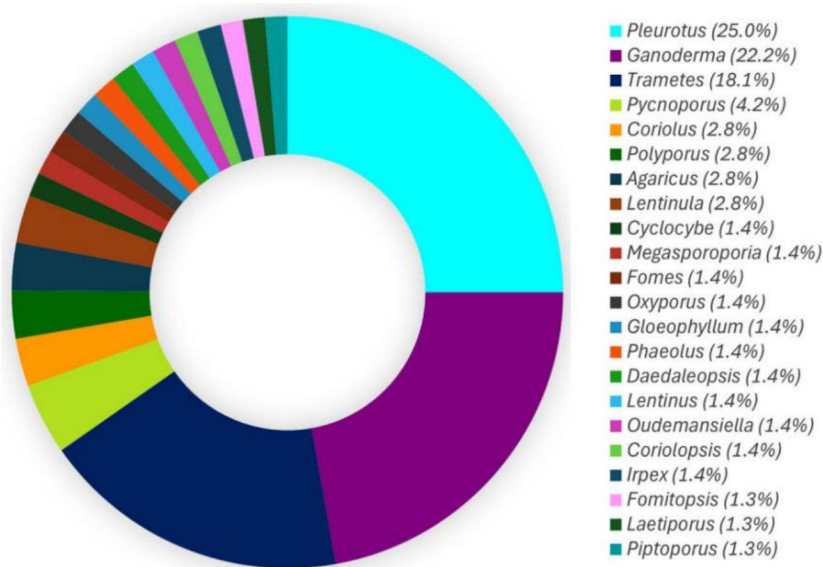


Gráfico 1 – Espécies primárias de fungos utilizadas para a produção de compósitos fúngicos. Retirado de (Parhizi *et. al.*, 2025).

Espécies como a *Trametes versicolor*, *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus*, são muito utilizados pela sua alta capacidade de degradar os compostos lignocelulósicos, se classificando como fungos de podridão branca (JONES *et al.*, 2020; AIDUANG *et al.*, 2022; ELSACKER *et al.*, 2019). Esta classe está muito relacionada à rapidez da degradação enzimática destes materiais, mas cada espécie pode apresentar sua individualidade. As espécies *T. versicolor* e *P. ostreatus* apresentam uma baixa seletividade entre lignina, celulose e hemicelulose, degradando rapidamente estes compostos. O *G. Lucidum* já se caracteriza por sua alta digestibilidade de lignina e fluidez na resposta à diferentes substratos (ELSACKER *et al.*, 2019), o que facilita a sua aplicação em diversos cenários. No fim, a versatilidade e a eficiência dos fungos de podridão branca estão relacionadas a degradação praticamente total dos substratos lignocelulósicos, sem nenhuma limitação, ao contrário dos fungos de podridão

marrom, que não possuem a capacidade de degradação de lignina por si só (NASHIRUDDIN *et al.*, 2022).

A degradação de lignina se apresenta como um desafio para os fungos justamente pela estabilidade química deste composto, e justamente por esta ser responsável pela composição de grande porcentagem da matéria orgânica residual gerada, o organismo fúngico capaz de realizar a degradação desta substância se torna um grande aliado da solução apresentada através dos compósitos. Os fungos de podridão branca possuem a capacidade de realizar a degradação da lignina através de diferentes enzimas digestivas, sendo as peroxidases as principais envolvidas neste processo. Estas são proteínas associadas a metais, que conseguem atuar como receptor de elétrons, oxidando estruturas fenólicas ou não fenólicas da lignina, as lacases, que estão associadas ao cobre, atuando na retirada de 1 elétron dos fenóis presentes na molécula, reduzindo o oxigênio a peróxido de hidrogênio, que poderiam gerar problemas para os fungos, porém o peróxido é reabsorvido pelas peroxidases para a reoxidação de sua estrutura, assim tornando o processo retro alimentável (AGUIAR; ANDRÉ, 2011).

Segundo Sydor *et al.* a seleção de uma espécie pode gerar alguns problemas na produção do material, dentre elas a raridade da espécie, que pode dificultar o acesso a este tipo de tecnologia, a falta de compatibilidade entre o fungo e o substrato selecionado, o que dificulta ou impossibilita o desenvolvimento do micélio, e por fim um fungo que não possua as características necessárias para a criação e crescimento do micélio (SYDOR, Maciej *et al.*, 2022). Dentre estes pontos, variações extremas podem inutilizar a produção do compósito, porém, alterações mais sutis podem influenciar diretamente em propriedades obtidas no material final gerado, impactando a utilização deste em diferentes aplicações.]

A Figura 5 apresenta a estrutura dos materiais lignocelulósicos e os principais mecanismos envolvidos em sua biodegradação por fungos. Destacam-se as lacases e peroxidases, fundamentais para a quebra da lignina. As lacases utilizam íons $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ como cofatores, permitindo a oxidação de unidades fenólicas da lignina por transferência de elétrons acoplada à redução do oxigênio molecular a água. Em paralelo, as manganês peroxidases oxidam o Mn^{2+} a Mn^{3+} , promovendo a oxidação de estruturas aromáticas da lignina. Esses mecanismos oxidativos são muito importantes para a redução da estabilidade da matriz

lignocelulósica, o que facilita o trabalho posterior que será realizado pelas celulases e hemicelulases.

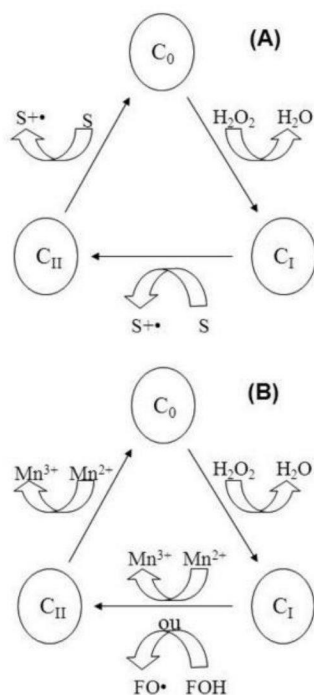


Figura 6 – Ciclo catalítico simplificado da LiP (A) e MnP (B); S = substrato aromático; FOH = substrato fenólico. Adaptado de (AGUIAR, 2011).

A Figura 6 ilustra a atuação conjunta de lacases que utilizam o cobre, que promovem a degradação seletiva da lignina, reduzindo a densidade do substrato e tornando mais expostas as frações polissacarídicas.

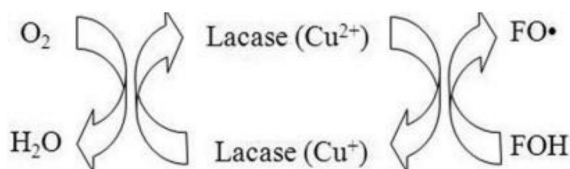
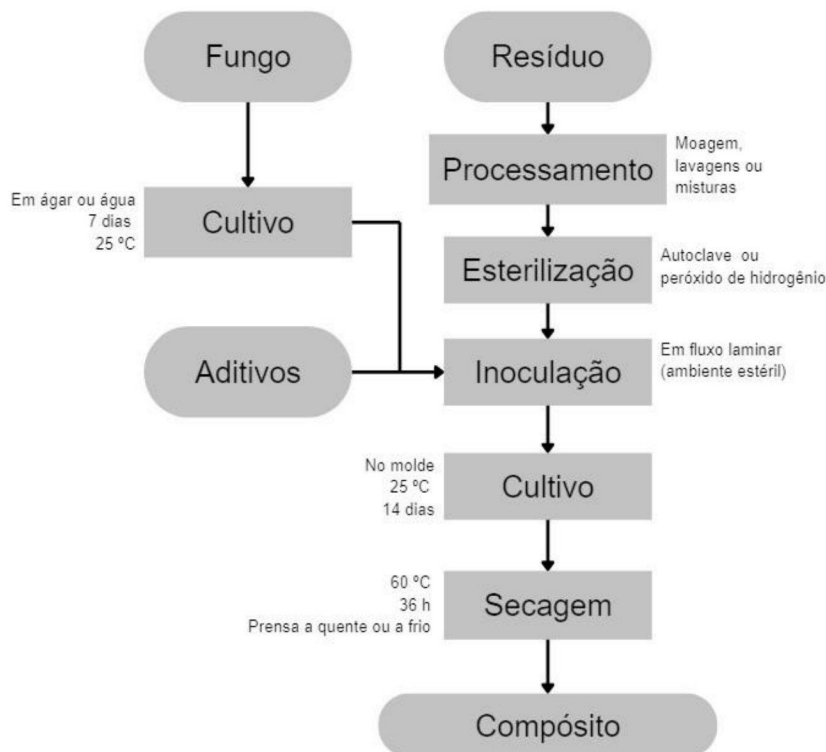


Figura 7 – Ciclo catalítico das lacases; FOH = substrato fenólico. A estequiometria do ciclo envolve 4 Cu²⁺ (normalmente ligados a uma única proteína ou a 2 cadeias proteicas acopladas), 4 substratos fenólicos, 4 prótons e 1 molécula de O₂. Adaptado de (AGUIAR, 2011)

3.1.1 Potencial como Substrato

Dentre as características químicas dos substratos, a composição e proporção de lignina, celulose, hemicelulose, são essenciais para a determinação de propriedades do compósito formado, como apresentado anteriormente. Dentre estes compostos, a celulose e hemicelulose atuam como os principais fornecedores de carbono para o fungo por conta da facilidade de degradação de sua cadeia polimérica que fornece energia de maneira rápida e eficiente, facilitando o alongamento das estruturas de hifas do fungo; assim, substratos ricos em celulose se caracterizam como robustos, densos e mecanicamente resistentes. Já a lignina, por se tratar de uma substância composta por uma estrutura polimérica fenólica, dificulta a degradação, justamente por muitos fungos não terem enzimas que consigam realizar tal decomposição, assim tornando o processo enzimático muito lento e ineficiente. Sendo as moléculas de celulose e hemicelulose responsáveis pela estrutura esquelética das plantas, a lignina atua como um agente ligante entre as fibras deste material fornecendo um aumento na rigidez da estrutura, assim, materiais com definidas características vão agregar da mesma maneira estas propriedades ao compósito produzido.



Esquema 2 – Fluxograma do método de produção padrão dos micélios

Assim como a composição química desses materiais exerce uma influência no desenvolvimento do fungo e, conseqüentemente dos compósitos, a estrutura física na qual eles se encontram também pode afetar diretamente todo o processo. Entre as características que afetam o desenvolvimento dos fungos em todo o processo, tem-se o tamanho da área de contato e a absorvidade de água do material. Tais fatores facilitam o contato entre as hifas do fungo e o substrato, assim acelerando o crescimento ou tornando todo o processo mais eficiente. Neste contexto materiais como chips, serragem, farelos, entre outros, se destacam da mesma forma que madeiras sólidas e fragmentos lignocelulósicos maiores e com baixa porosidade são menos eficientes para esta tecnologia.

Segundo Sydor *et al.*, através de aproximadamente 100 artigos selecionados que desenvolvem materiais à base micélio fúngico através do crescimento dos fungos em resíduos agrícolas. Os resíduos mais citados são de fibra de celulose, fibra de algodão, fibra de cânhamo, madeira (não especificada), madeira de pínus, madeira de carvalho, farelo de trigo, palha de trigo e cânhamo. O estudo também inclui na contagem, diferentes relações entre os subprodutos utilizados (SYDOR, Malgorzata *et al.*, 2021). Ao se utilizar certos resíduos ou subprodutos que não possuem composições lignocelulósicas diversas, ou seja, pobre em algum das três moléculas de interesse podem ser utilizadas como estratégia a aplicação de diferentes materiais, com a finalidade de promover uma suplementação ao substrato, que então poderá ser ideal para uma série de fungos, favorecendo a prática desta tecnologia a diferentes cenários e biomassas.

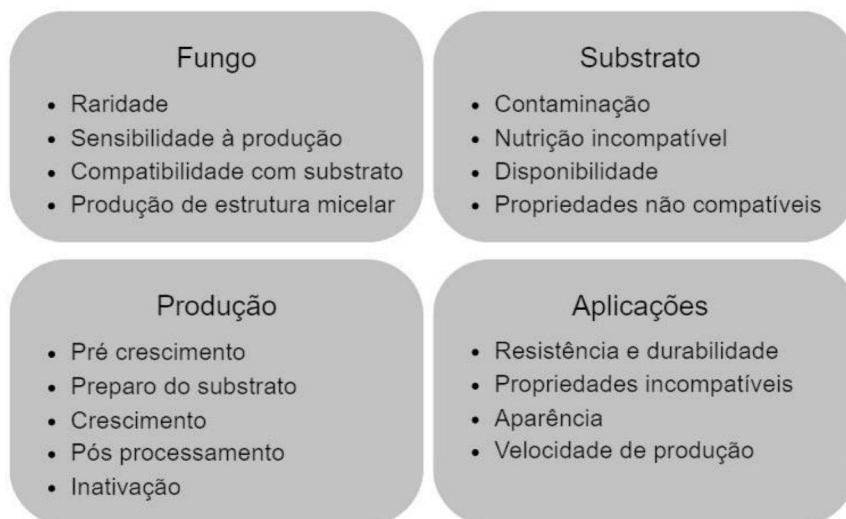
3.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Para a produção de um compósito micelar, é necessária a execução de um procedimento sequencial, o qual é formado por etapas lógicas e essenciais para a integridade e crescimento do fungo no substrato, evitando ao máximo contaminações e interferências externas que possam afetar a produção do material desejado. Dentro do procedimento, apresentado pelo fluxograma apresentado no Esquema 3, existem diferentes etapas, algumas delas estabelecidas como padrão pela literatura. Dentre elas o preparo do substrato onde serão padronizados parâmetros como esterilização e umidade, a inoculação do fungo do meio de crescimento, crescimento do fungo, e inativação do compósito. Muitas das etapas e condições citadas podem ser flexibilizadas, visando abranger diferentes contextos, como a própria disponibilidade de substrato e dos fungos, mas também da estrutura necessária para

a produção dos materiais em uma escala própria para o setor situado (SYDOR, Maciej *et al.*, 2022).

3.2.1 Definição dos materiais

Para o desenvolvimento de um compósito fúngico, a primeira etapa do processo se dá pelo planejamento do processo a partir de alguns requisitos principais, dentre eles a aplicação que será direcionada o material e a disponibilidade dos substratos. Assim se torna muito relevante o direcionamento da colonização do meio com um fungo que seja capaz de se adaptar e que também consiga produzir uma estrutura micelial adequada à aplicação. O processo de seleção do fungo pode ser considerado como um desafio, devido a alta diversidade de fungos existentes, porém apenas algumas espécies são exploradas pela literatura. A próxima etapa do planejamento consiste na definição da estrutura e dos materiais que serão utilizados na produção dos compósitos, como por exemplo, o molde que será utilizado como por exemplo a cuba de crescimento do fungo. Este deve não apenas garantir as condições necessárias, mas também proporcionar a definição da estrutura geométrica que o compósito terá. Dentre os requisitos a serem determinados, alguns fatores podem afetar o desenvolvimento da produção, como apresentado no esquema 3.



Esquema 3 – Fatores que afetam a funcionalidade e aplicação em diferentes áreas de produção do micélio. Adaptado de (SYDOR, Maciej *et al.*, 2022)

3.2.2 Preparação do Substrato

Após a seleção do substrato que será utilizado, este deve ser tratado para aumentar a eficiência de todo o processo e evitar problemas paralelos ao procedimento, como possíveis contaminações ou um desenvolvimento fúngico irregular. Assim a secagem e a moagem do resíduo se dá por uma sequência de etapas muito simples, mas que podem afetar diretamente todo o desenvolvimento posterior do fungo. A moagem permite a redução do tamanho das partículas do substrato situado e, portanto, o estabelecimento de um padrão do substrato.

Antes do contato entre o fungo e o substrato, a esterilização do ambiente de cultivo deve ser preservada, assim podendo ser realizada de diferentes formas. Dentre os estudos selecionados nesta revisão, os métodos de esterilização utilizados são a esterilização térmica, pasteurização por água quente e lavagem com solução esterilizante. Assim como o substrato, os frascos, cuba de crescimento, moldes ou outro material que será utilizado no processo, podem ser esterilizados junto com o substrato, para tornar o processo mais eficiente, prático e seguro.

Dentre os métodos utilizados para autoclavar o substrato, as temperaturas podem variar entre 115 a 121 °C, com duração de 15 a 28 minutos (ELSACKER *et al.*, 2020). Autoclavar o material pode garantir a eficácia na esterilização do material, como também fornecer alguns efeitos colaterais positivos, como a separação das fibras de celulose, fragilização das estruturas de lignina da parede celular vegetal, gerando um ambiente mais adequado e preparado para a degradação do material pelos fungos, aumentando os poros do material que serão penetrados pelas hifas do fungo, e fragilizando estruturas que demandariam um gasto energético alto aos fungos, tornando a degradação do material mais eficiente. Este método se apresenta então muito eficiente, porém em contrapartida, se apresenta como um ponto de limitação para a sua aplicação em produções de compósitos que sejam realizadas em larga escala devido a necessidade de uma grande infraestrutura. Outro método também empregado é de pulverizar ou até mergulhar o substrato em soluções de peróxido de hidrogênio de 0,3 a 10 % ou álcool etílico 70 %, que também atuam como agentes esterilizantes, podendo ser utilizados em larga escala, mas não vão agregar efeitos colaterais tão importantes como a autoclave, e em paralelo podem afetar o crescimento do micélio, caso haja uma permanência excessiva da solução ao fim do procedimento.

O substrato, independentemente do método de esterilização utilizado, deve ser mantido em um ambiente estéril e umidade baixa e controlada, podendo ser realizado, para fins práticos e seguros, a pesagem ou fracionamento do substrato e esterilização diretamente no frasco ou molde onde será realizado todo o processo de crescimento do fungo, evitando assim, contaminações paralelas.

3.2.3 Inoculação e Incubação

A etapa de inoculação do fungo consiste em adicionar fungo e água ao substrato estéril, podendo ter algumas variações dentre as metodologias disponíveis na literatura, essas diferenças estão relacionadas à utilização de diferentes tipos de iniciador, onde em alguns casos diretamente os esporos do fungo para inocular o material, já outros estudos trazem o uso de cepas do fungo já crescidas em algum meio, seja ele em algum substrato sólido, em água ou ágar, que é dissolvido em água e inoculado ao substrato já esterilizado (ELSACKER *et al.*, 2020). Esta segunda forma de se realizar a inoculação pode adicionar uma etapa a este processo, o que pode ser necessário dependendo das limitações ou particularidades do fungo utilizado. Vale ressaltar que independentemente do método utilizado, junto ao fungo, deve-se adicionar água ao substrato, para manter o substrato com umidade controlada. Durante a etapa de inoculação, alguns trabalhos ressaltam a importância da adição de soluções nutritivas estéreis ao substrato como glicose ou farelo, para fortalecer o crescimento e melhorar o desenvolvimento do micélio (ELSACKER *et al.*, 2020).

A partir do meio já inoculado, o mesmo deve-se manter no seu molde previamente esterilizado, em temperatura e umidade constante e controlada, variando nos estudos de 25 a 28 °C e 60 a 65 % de umidade relativa, para manter o fungo nas suas condições ideais de crescimento, assim como a troca de ar, que pode ser realizada manualmente ou através de filtros de ar que possam realizar a passagem do mesmo, isso é fundamental pois há a necessidade dos fungos consumirem oxigênio e liberarem CO₂, mas sem que ocorra a entrada de organismos nocivos ou contaminantes ao material preparado (ELSACKER *et al.*, 2020; SYDOR, Maciej *et al.*, 2022).

3.2.4 Secagem

Após um período de 14 a 21 dias de crescimento do micélio, o composto tende a se apresentar como uma espuma, porém para realizar qualquer manipulação deste material, é de

extrema importância que este seja tratado com a finalidade de eliminar o fungo presente, evitando assim, contaminações e ainda sim agregar algumas propriedades como o aumento da dureza do material. A secagem normalmente é realizada em estufa por meio de ar quente, a temperaturas suficientes para a secagem do material e a morte do fungo associado, sem prejudicar as propriedades ou estrutura do compósito formado (aproximadamente 60 °C por 36 h) (ELSACKER *et al.*, 2019; JONES *et al.*, 2020).

3.2.5 Tratamentos e alternativas de preparo

Dentre todos os estudos base para esta revisão, alguns pesquisadores realizaram o desenvolvimento de materiais com algumas características diferentes. Estes foram obtidos através de tratamentos realizados após o crescimento do micélio, ou mesmo pela produção do mesmo desde o início acoplado a outros materiais que formavam uma sequência de camadas, permitindo diferentes propriedades ao material obtido (SYDOR, Maciej *et al.*, 2022). A prensagem, a frio ou a quente, é um método muito utilizado no desenvolvimento de materiais, com a finalidade de retirar o ar, água e muitas vezes reduzir a porosidade excessiva do material em questão, e no caso dos compósitos fúngicos, não é diferente. Uma prensagem do material torna-o poroso e pouco denso em um outro com uma estrutura mais rígida e densa, podendo ter diferentes propriedades físico-químicas associadas a estas características (SYDOR, Malgorzata *et al.*, 2021; AIDUANG *et al.*, 2022).

Outra alternativa é a fabricação dos compósitos junto a outros materiais, como por exemplo a presença de camadas de fibras vegetais como o cânhamo, que pode conferir resistência ao material e ainda garantir as propriedades inerentes ao compósito. De forma adicional, têm-se alguns estudos voltados a compósitos acrescidos de algumas substâncias como argila, cargas minerais entre outros aditivos, que não vão interagir com o fungo, mas sim acrescentar ou aumentar propriedades à estrutura do compósito, como por exemplo a resistência ao fogo.

3.2.6 Propriedades dos Compósitos

Um material, para ser destinado a uma devida aplicação, deve possuir características que condiz com o tipo de propriedade que será explorada. Como exemplo o micélio, podendo ser utilizado como substituto do isopor em embalagens, deve apresentar boa taxa de

compressão do material, assim como em materiais como cintas devem possuir boas resistências à tração. Independente da aplicação situada, certas combinações de substratos e fungos já são exploradas pela ciência, apresentando resultados que mesmo sem um direcionamento exclusivo, pode indicar aplicações para diferentes compósitos. Dentre as propriedades apresentadas pela literatura, tem-se como as principais abordadas neste trabalho a resistência a tração, compressão e fogo, isolamento acústico e térmico, hidrofobicidade e hidrofiliabilidade (Jones, 2020).

A resistência a tração é a propriedade que indica o quanto de tensão que o material resiste antes de se romper ou se deformar. Este tipo de teste é realizado em corpos de prova em formato de tiras, que são presas pelas extremidades do seu comprimento e são submetidos a uma crescente força de tração até a ruptura de sua estrutura. Parâmetros muito relevantes neste tipo de caracterização são obtidos por metodologias como a ASTM D638, podendo em alguns estudos utilizar a análise DMA (Análise dinâmico mecânica), que analisa todas as informações em função da alteração de temperatura. Os resultados apresentados pelos compósitos fúngicos pela literatura podem variar de 0,1 a 1,0 MPa de Tensão máxima suportada, podendo ser obtidos diferentes resultados dependendo da espécie fúngica ou substrato utilizado na composição do material, se destacando no cenário os compósitos produzidos por o *Ganoderma Lucidum* devido a sua produção hifática densa (JONES *et al.*, 2020; ISLAM *et al.*, 2023).

Outra propriedade muito relevante, que direciona os compósitos fúngicos a algumas aplicações, é o isolamento acústico inerente ao material, Attias *et al.* relaciona coeficientes de absorção acústica para a faixa de frequência entre 1000 a 2000 Hz, sendo muito aproximada da absorção característica do poliestireno expandido (Attias *et al.*, 2020).

Propriedades adicionais podem ser agregadas aos compósitos como por exemplo a baixa condutividade térmica, onde valores entre 0,04 e 0,07 W/m.K, o que o caracteriza como um isolante termico semelhante aos isolantes convencionais (ELSACKER *et al.*, 2019; JONES *et al.*, 2020). Além disso os fungos conferem ao compósito propriedades hidrofobicidade devido a composição química da parede celular (ISLAM *et al.*, 2023). Por fim, outra propriedade que pode ser analisada, é da resistência ao fogo, que pode ser relacionada com os compósitos formados a partir de substratos ricos em sílica como aqueles obtidos a partir da casca de arroz

(JONES *et al.*, 2020). Vale ressaltar que revestimentos podem ser realizados à superfície dos materiais, para adicionar ou ampliar características inerentes ao compósito.

4 APLICAÇÕES

O compósito micelial pode ser facilmente utilizado em diferentes aplicações por muitos motivos, dentre eles a alta sustentabilidade e degradabilidade do material. Tal fato pode ser utilizado como ponto estratégico, sendo utilizado como alternativa de muitos materiais que são provenientes de matriz não renovável como o petróleo. Dentre as aplicações, algumas propriedades e características podem ser alteradas ou manipuladas a partir da adição de resinas e revestimentos que permitem o aumento da vida útil do material, ou agregam características como a dureza. Uma das grandes áreas da ciência que busca este tipo de tecnologia é a engenharia civil, que pode utilizar dos compósitos fúngicos para agregar sustentabilidade a estruturas.

Na engenharia civil publicações recentes retratam o potencial de aplicação dos compósitos à materiais utilizados para a produção de revestimentos internos de paredes e portas, espumas de isolamento térmico e acústico, laminados para pisos e revestimentos como um todo (JONES *et al.*, 2020), podendo então agregar à estrutura as propriedades do material, o que agrega valor e função prática dos objetos produzidos. Algumas empresas do ramo como por exemplo a Ecovative Design LLC (Green Island, EUA), que foi responsável pela patente de métodos de produção de compósitos para a aplicação em painéis.

Outra aplicação muito relevante é a produção de compósitos miceliais para a elaboração de diversos materiais do setor têxtil, onde o material formado pode ser utilizado como alternativa ao couro animal, o que pode ser muito interessante para a redução de matrizes animais. Como o couro, seja sintético ou de origem animal, é amplamente utilizado em diversos produtos, a adoção de um método ecológico para a sua produção representa uma proposta de alto valor agregado. Entre as características essenciais para este tipo de material destacam-se a resistência à tração e compressão, maleabilidade e uniformidade de cor. Como exemplo prático do uso destas tecnologias, tem-se a MycoWorks (Califórnia, EUA), empresa que possui patentes do método de cultivo e crescimento de folhas de micélio com características definidas.

Outra importante aplicação com alto potencial de implementação, é dos compósitos substituírem um tipo de material muito utilizado pela indústria de embalagens, popularmente conhecido como isopor (EPS), onde o micélio, apresentado por Nashiruddin *et. al* como uma bio espuma, apresenta muitas características como a resistência e baixa densidade do material, que

podem oferecer para fins de redução de impacto em materiais frágeis, um material ecológico e biodegradável, que diferente do utilizado atualmente, pode ser compostado, evitando a produção de lixo, e reduzindo o uso de plásticos. Este tipo de material também está englobado na patente dos processos de produção da Ecovative Design LLC (Green Island, EUA).

Um setor que também tem interesse nos compósitos é a arquitetura, onde compósitos de diferentes formatos podem ser produzidos pelos fungos e utilizados para a decoração e revestimento de ambientes, este tipo de aplicação não carece de características físico-químicas muito restritas a não ser a resistência a umidade e a coloração, porém algumas propriedades inerentes ao material como o próprio isolamento acústico pode agregar valor ao produto, assim materiais como laminados, e objetos decorativos no geral podem ser produzidos com os compósitos, tendo sua natureza de produção incluída na patente da Ecovative Design LLC (Green Island, EUA).



Figura 8 – Compósitos fúngicos em diferentes produtos. (Jones, 2020)

4.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Os compósitos fúngicos podem apresentar uma série de características ecologicamente amigáveis, o que implica em pontos muito positivos pelo ponto de vista da sustentabilidade. Podem ser utilizados como uma ótima alternativa na substituição de uma grande quantidade de produtos já utilizados pela sociedade, principalmente aos materiais que geram danos ao meio ambiente, seja pela sua produção ou pelo seu descarte na natureza. Podendo citar o que acontece com materiais derivados de petróleo, que geram através da sua produção, muitos gases danosos ao meio ambiente, assim como a geração de micro plásticos que também são vilões da sustentabilidade.

Um dos principais pontos positivos dos compósitos fúngicos é o reaproveitamento de materiais residuais, alinhando-se aos princípios da economia circular e agregando valor a

recursos de baixo valor pela sociedade atual. Desta forma a redução de tratamentos ambientalmente inadequados surge como uma alternativa para o setor agrícola. Por fim, o que agrega mais valor ao compósito fúngico se dá pela facilidade de produção destes compósitos, em que métodos simples podem gerar produtos com qualidade similar aos utilizados pela sociedade atual, e mesmo as dificuldades associadas a esterilização dos materiais, podem ser direcionadas a métodos alternativos que podem ser utilizados na intenção de reduzir o custo de toda a produção e contornar estes desafios.

Como toda inovação, existem pontos negativos inerentes a proposta, no presente estudo uma das deficiências da tecnologia se dá pela utilização de uma enorme quantidade de plásticos descartáveis durante todo o processo, o que torna uma produção excessiva de materiais residuais danosos ao meio ambiente. Outra questão é o tempo excessivo para o preparo dos materiais compósitos, o que pode afetar a adesão desta tecnologia ao setor agrícola.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os compósitos já apresentaram resultados muito relevantes para diferentes aplicações e áreas da indústria, o que implica em um produto alternativo muito relevante e agradável para o momento atual da sociedade que visa a utilização de materiais que estão associados a menores impactos negativos à natureza, principalmente quando comparados a produtos tradicionalmente utilizados sem perder as funções e qualidades inerentes a eles.

Para estudos futuros, é necessária a avaliação do padrão de qualidade dos materiais quando realizados em larga escala, assim como a avaliação de alternativas de processos menos demorados que possam facilitar a produção dos micélios. Outra questão é a utilização de materiais não plásticos e reutilizáveis no processo de produção destes materiais, que implica na redução de resíduos durante o processo. Sabendo da aplicação comercial destes produtos já consolidada em diferentes países da Europa, realizar a produção e implementação destes no Brasil, este sendo um dos maiores produtores de resíduos agrícolas do mundo, pode gerar um efeito muito positivo para o país, tanto na economia como um todo, como na redução de produtos nocivos ao meio ambiente.

Outra questão pouco explorada pela literatura é da destinação destes materiais após o uso em setores como de embalagens, que são destinados a aterros ou outros locais que estão

associados a impactos negativos ao meio ambiente, logo, apresentar alternativas de destinação destes materiais, ou da própria utilização destes como matéria prima para o mesmo ou outros mercados, pode ser um ponto chave para a aplicação e consolidação de propostas comerciais efetivas de aplicação destes materiais.

Os compósitos fúngicos são biomateriais muito interessantes, associados a valores como a sustentabilidade e economia circular desde sua essência. Estes estão associados a propriedades físico-químicas muito interessantes como a resistência e o isolamento térmico e acústico. Agregando os valores às propriedades inerentes a eles, os compósitos fúngicos tem potencial de serem produzidos em larga escala no Brasil, assim como entregar ao consumidor materiais biodegradáveis e ecológicos por meio de diferentes áreas da indústria.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. AGUIAR, André Ferraz; Mechanisms involved in the biodegradation of lignocellulosic materials and related technological applications. **Química Nova**, v. 34, n. 10, —, 2011.
2. AIDUANG, Worawoot; CHANTHALUCK, Athip; KUMLA, Jaturong; JATUWONG, Kritsana;
3. SRINUANPAN, Sirasit; WAROONKUN, Tanut; ORANRATMANEE, Rawiwan;
4. LUMYONG, Saisamorn; SUWANNARACH, Nakarin. Amazing Fungi for Eco-Friendly Composite Materials: A Comprehensive Review. **Journal of Fungi**, MDPI, v. 8, n. 8, p. 842, 2022.
5. AL, Nimisha Tripathi et. Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. **npj Climate and Atmospheric Science**, 2019.
6. Siqueira, M. U.; Contin, B.; Fernandes, P. R. B.; Ruschel-Soares, R.; Uhlig Siqueira, P.; Baruque-Ramos, J. *Brazilian Agro-industrial Wastes as Potential Textile and Other Raw Materials: a Sustainable Approach*. (Springer / 2022).
7. BENTSEN, Niclas S.; FELBY, Claus. Biomass for energy in the European Union — a review of bioenergy resource assessments. **Biotechnology for Biofuels**, v. 3, n. 24, p. 1–10, 2010.
8. BOERJAN, Wout; RALPH, John; BAUCHER, Michel. Lignin biosynthesis. **Annual Review of Plant Biology**, v. 54, p. 519–546, 2003.
9. CONAB. **Boletim da Safra de Algodão 2020/21**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>.
10. CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA); CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA) [S.l.: s.n.], 2024. <https://www.cnabrasil.org.br/noticias/pib-do-agronegocio-cai-2-99-em-2023>. Acesso em: 17 maio 2025.
11. DEACON, J. W. **Fungal Biology**. [s.l.]: Blackwell Publishing, 2006.
12. EGBO, M. K. et al. A fundamental review on composite materials and some of their applications. **Composite Structures**, v. 232, p. 111476, 2021.
13. ELSACKER, Elise; VANDELOOK, Simon; BRANCART, Joost; PEETERS, Eveline; DE LAET, Lars. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. **PLOS ONE**, Public Library of Science, v. 14, n. 7, e0213954, 2019.

14. ELSACKER, Elise; VANDELOOK, Simon; VANWYLICK, Aurélie; RUYTINX, Joske; DE LAET, Lars; PEETERS, Eveline. A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 725, p. 138431, 2020.
15. EMBRAPA. **Aproveitamento da biomassa da cana-de-açúcar**. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>.
16. EMBRAPA. **Aproveitamento de casca de arroz para bioenergia**. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/clima-temperado>.
17. EMBRAPA. **Aproveitamento de resíduos da cafeicultura**. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cafe>.
18. EMBRAPA. **Resíduos da cotonicultura e seu aproveitamento**. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/algodao>.
19. EMBRAPA. **Resíduos da soja como biomassa energética**. [S.l.: s.n.], 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>.
20. GOW, Neil A. R.; GADD, Geoffrey M. (Ed.). **The Growing Fungus**. London: Springer Science & Business Media, 1995. ISBN 978-0-412-47250-1.
21. GOW, Neil A. R.; LATGÉ, Jean-Paul; MUNRO, Carol A. The Fungal Cell Wall: Structure, Biosynthesis, and Function. **Microbiology Spectrum**, American Society for Microbiology, v. 5, n. 3, funk-0035–2016, 2017.
22. HANEEF, Muhammad; CESERACCIU, Luca; BAYER, Philipp; HEREDIA-GUERRERO, Jose A.;
23. ATHANASSIOU, Athanassia. Mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 107, n. 7, p. 2703–2722, 2023.
24. HON, David N. S.; SHIRAISHI, Nobuo (Ed.). **Wood and Cellulosic Chemistry**. 2nd. Boca Raton: CRC Press, 2001. ISBN 9780824700249.
25. HSISSOU, Rachid; SEGHIRI, Rajaa; BENZEKRI, Zakaria; HILALI, Miloudi; RAFIK, Mohamed; ELHARFI, Ahmed. Polymer composite materials: A comprehensive review. **Composite Structures**, v. 262, p. 113640, 2021.
26. IPEA. **Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas**. [S.l.], 2012. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&id=16419.

27. ISLAM, M. R.; TUDRYN, G.; BUCINELL, R.; SCHADLER, L.; PICU, C. R. Mycelium-based composites: An updated comprehensive overview. **Composites Part C: Open Access**, v. 13, p. 100161, 2023.
28. JONES, Mitchell; MAUTNER, Andreas; LUENCO, Stefano; BISMARCK, Alexander; JOHN, Sabu. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. **Materials & Design**, Elsevier, v. 187, p. 108397, 2020.
29. JUNIOR, Silvio Vaz. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. Brasília, 2020. Série Documentos, n. 31. Disponível em:
30. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1126255/1/S-VAZ-Aproveitamento-deresiduos-agroindustriais.pdf>.
31. KHAN, Rahim. Mycelium-based bioproducts: A novel material for a sustainable economy – A comprehensive review. *The Microbe*, Elsevier, v. 8, p. 100439, 2025.
32. KLEMM, Dieter; HEUBLEIN, Bernd; FINK, Hans-Peter; BOHN, Andreas. Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 44, n. 22, p. 3358–3393, 2005.
33. KUMAR, P.; JOSHI, L. Air pollution and health hazards due to burning of crop residue in India: A review. **Environmental Pollution**, v. 236, p. 351–361, 2019.
34. KUMLA, Jaturong; SUWANNARACH, Nakarin; SUJARIT, Kanaporn; PENKHRUE, Watsana; KAKUMYAN, Pattana; JATUWONG, Kritsana; VADTHANARAT, Santhiti; LUMYONG, Saisamorn. Cultivation of Mushrooms and Their Lignocellulolytic Enzyme Production Through the Utilization of Agro-Industrial Waste. *Molecules*, MDPI, Basel, Switzerland, v. 25, n. 12, p. 2811, 2020.
35. LACKNER, M.; BESHARATI, M. Agricultural Waste: Challenges and Solutions, a Review. *Waste*, v. 3, n. 2, p. 1–32, 2025.
36. LIMA, Magda Aparecida de; LIGO, Marcos Antonio Vieira; PESSOA, Maria Conceição Peres Young; NEVES, Marcos Corrêa; CARVALHO, Elton César de. **Emissões de gases de efeito estufa na queima de resíduos agrícolas**. Brasília, 2010.
37. MÄKELÄ, Miia R. Plant biomass degradation by fungi. **Fungal Genetics and Biology**, 2014.
38. NASHIRUDDIN, Noor Idayu; CHUA, Kai Shin; MANSOR, Azmi Fadziyana; RAHMAN, Roshanida A.; LAI, Jau Choy; WAN AZELEE, Nur Izyan; EL ENSHASY, Hesham. Effect of growth factors on the production of mycelium-based biofoam. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Springer, v. 24, p. 351–361, 2022.

39. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivo 12: Assegurar padrões de produção e de **consumo sustentáveis – Meta 12.5**. [S.l.: s.n.], 2015. <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12>. Acesso em: 17 maio 2025.
40. ROTHSCHILD, Lynn J.; MAURER, Caitlin; PAULINO LIMA, Igor G.; SENESKY, Debbie; WIPAT, Anil; HEAD, John III. Myco-architecture off planet: growing surface structures at destination. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 2407, 2019.
41. SCHMIDELL, W.; LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. **Biotecnologia Industrial: Engenharia Bioquímica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2019.
42. SILVA, V. L.; OLIVEIRA, T. A.; SANTOS, L. B.; FERREIRA, M. S. Resíduos agroindustriais lignocelulósicos: aplicações e perspectivas de valorização. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 6, p. 1543–1566, 2018.
43. SJÖSTRÖM, Eero. **Wood Chemistry: Fundamentals and Applications**. 2nd. San Diego: Academic Press, 1993. ISBN 9780126474817.
44. SYDOR, Maciej; COFTA, Grzegorz; DOCZEKALSKA, Beata; BONENBERG, Agata. Fungi in Mycelium-Based Composites: Usage and Recommendations. **Materials**, MDPI, v. 15, n. 18, p. 6283, 2022.
45. SYDOR, Malgorzata; BONENBERG, Wojciech; RYBARCZYK, Dominika; MAJKA, Joanna; JESIONOWSKI, Teofil. Mycelium-based bioproducts: A novel material for a sustainable economy. **Journal of Fungi**, v. 7, n. 12, p. 1069, 2021.
46. TRIPATHI, Nirmal; HILLS, Colin D.; SINGH, Rajesh S.; ATKINSON, Chris J. Agriculture residues and biomass waste: Current and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 191–201, 2019.
47. WONG, D. W. S. Structure and Action Mechanism of Ligninolytic Enzymes. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 157, p. 174–209, 2009.
48. Ecovative Design LLC, Mycocomposite - Mycelium-bound Agricultural Byproducts, <http://ecovatedesign.com/mycocomposite> 2019.
49. MycoWorks, Materials, <https://www.mycoworks.com/> 2019.