UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LETÍCIA BEWIAHN QUIAROTI

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE BIOCOMPÓSITOS FÚNGICOS PARA A PRODUÇÃO DE EMBALAGENS

PONTA GROSSA

2023

LETÍCIA BEWIAHN QUIAROTI

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE BIOCOMPÓSITOS FÚNGICOS PARA A PRODUÇÃO DE EMBALAGENS

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF FUNGAL BIOCOMPOSITES FOR PACKAGING PRODUCTION

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: prof.ª dr.ª Alessandra Cristine Novak Sydney.
Coorientador: dr.ª Janaina Marques de Almeida.

PONTA GROSSA

2023

4.0 Internacional

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LETÍCIA BEWIAHN QUIAROTI

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE BIOCOMPÓSITOS FÚNGICOS PARA A PRODUÇÃO DE EMBALAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 05 de maio de 2023

Maria Carolina de Oliveira Ribeiro
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eduardo Bitterncourt Sydney
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alessandra Cristine Novak Sydney
Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2023

RESUMO

O constante crescimento na produção de embalagens sintéticas vem causando cada vez mais impactos ao meio ambiente, surgindo assim a necessidade de desenvolver novas alternativas ao uso dessas embalagens. Os biocompósitos fúngicos são uma opção promissora a essa substituição, pois são utilizados resíduos agrícolas como substrato para desenvolver embalagens biodegradáveis e ecológicas. O presente trabalho foi realizado junto a Mush, empresa incubada na UTFPR-PG, e tem como objetivo caracterizar biocompósitos fúngicos produzidos com resíduos de serragem e casca de arroz como substratos. A caracterização foi realizada por meio de testes físicos e mecânicos, feitos seguindo as normas ISO 845:2006 e ASTM D792 – 20 para densidade, ASTM D570 – 2018 para absorção de água, ASTM D695 – 10 para compressão e UL 94 para inflamabilidade. Como resultado tem-se a caracterização física e mecânica dos protótipos de embalagens secundárias de biocompósitos fúngicos, de acordo com cada substrato utilizado, e sua viabilidade de uso. Assim, obteve-se respostas satisfatórias de ambos os protótipos para uso como embalagens secundárias de biocompósito fúngico, seguindo os parâmetros esperados e validação comercial.

Palavras-chave: biocompósito; fungo; embalagem; biodegradável.

ABSTRACT

The constant growth in the production of synthetic packaging is causing more and more impacts to the environment, thus arising the need to develop new alternatives to the use of such packaging. Fungal biocomposites are a promising option to this replacement, because agricultural waste is used as a substrate to develop biodegradable and ecological packaging. The present work was performed at Mush, a company incubated at UTFPR-PG, and aims to characterize fungal biocomposites produced with sawdust and rice husk waste as substrates. The characterization was performed through physical and mechanical tests, done following ISO 845:2006 and ASTM D792 - 20 for density, ASTM D570 - 2018 for water absorption, ASTM D695 - 10 for compression and UL 94 for flammability. As a result, one has the physical and mechanical characterization of the fungal biocomposite secondary packaging prototypes, according to each substrate used, and their feasibility of use. Thus, satisfactory responses were obtained from both prototypes for use as fungal biocomposite secondary packaging, following the expected parameters and commercial validation.

Keywords: biocomposite; fungus; packing; biodegradable.

LISTA ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação embalagens quanto a função 12
Figura 2: Ciclo de vida dos cogumelos 15
Figura 3: Estrutura teste vertical de inflamabilidade 26
Fotografia 1: Aparato para teste de densidade com material flutuando 23
Fotografia 2: Corpos de prova para os testes físicos 28
Fotografia 3: Teste de absorção de água 30
Fotografia 4: Ensaio de resistência à compressão 31
Fotografia 5: Corpo de prova antes e após o teste de compressão 32
Fotografia 6: Teste de inflamabilidade por queima vertical 33
Fotografia 7: Protótipos de embalagem de biocompósito fúngico 34

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1: Dimensões dos corpos de prova 28
Tabela 2: Resultados gerais dos testes físicos 29
Tabela 3: Resultados teste de inflamabilidade dos biocompósitos fúngicos 33
Quadro 1: Critérios de classificação inflamabilidade dos biocompósitos fúngicos 32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9
2 OBJETIVOS 11
2.1 OBJETIVO GERAL 11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11
3 REVISÃO DA LITERATURA 12
3.1 EMBALAGENS 12
3.2 BIOCOMPÓSITOS 13
3.3 FUNGO 15
3.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DA EMBALAGEM FÚNGICA 16
3.4.1 SERRAGEM 17
3.4.2 CASCA DE ARROZ 18
3.5 TESTES FÍSICOS 19
3.5.1 TESTE DE DENSIDADE 19
3.5.2 TESTE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA 19
3.5.3 TESTE DE COMPRESSÃO 20
3.5.4 TESTE DE INFLAMABILIDADE 20
4 MATERIAIS E MÉTODOS 21
4.1 MICRORGANISMO 21
4.2 COMPÓSITO 21
4.3 TESTES FÍSICOS 21
4.3.1 DENSIDADE 22
4.3.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA 22
4.3.3 COMPRESSÃO 23
4.3.4 INFLAMABILIDADE 24
4.4 PROTÓTIPO DE EMBALAGEM 26
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 26
5.1 PRODUÇÃO DE CORPOS DE PROVA 26
5.2 TESTES FÍSICOS 27
5.2.1 DENSIDADE 28
5.2.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA 29
5.2.3 COMPRESSÃO 30

SUMÁRIO

5.2.4 INFLAMABILIDADE 31
5.3 PROTÓTIPO DE EMBALAGEM 33
6 CONCLUSÃO 36
REFERÊNCIAS 36

1 INTRODUÇÃO

A predominância do uso de embalagens sintéticas é uma realidade que tem crescido exponencialmente desde a industrialização, principalmente na atualidade, com o crescimento do *e-commerce* e consequentemente do uso de embalagens plásticas. De acordo com um levantamento da Neotrust (2022) o faturamento de *e-commerce*, no Brasil, em janeiro de 2022 aumentou 21% em relação ao mesmo mês no ano anterior, e 65% em relação a 2020, chegando a um volume de 31,1 milhões de compras *online*. Favorecida por esse comércio *online*, a produção de embalagens expandiu 6,8% em 2020, com crescimento de até 5,9% ao final de 2022, de acordo com a Associação Brasileira de Embalagem (ABRE, 2021).

Com esse aumento constante no uso e produção de embalagens não ecológicas é necessário um devido descarte desses materiais para tentar evitar maiores impactos ambientais, porém isso não é uma realidade. Uma pesquisa da WWF do Atlas do Plástico (2020) afirma que apenas 1,28% das embalagens vão para o tratamento de reciclo, sendo que o Brasil é o quarto maior produtor de lixo plástico no mundo. Logo, o uso desenfreado desses materiais não biodegradáveis resulta cada vez mais em um acúmulo de lixo prejudicial ao meio ambiente. Assim, alternativas mais ecológicas, como as embalagens biodegradáveis, são cada vez mais interessantes para substituir o plástico e outros materiais não ecológicos (MATHUROS, 2016).

Uma alternativa de embalagens biodegradáveis são as produzidas a partir de biocompósitos fúngicos, materiais feitos à base de micélio de fungo e resíduos agroindustriais. O micélio vem sendo utilizado como uma alternativa inovadora para fabricação de diversos produtos pois tem características sustentáveis, são biocompatíveis e biodegradáveis, além de se comportar como um condicionador de solos tipo A (SANTOS, 2020).

As agroindústrias geram inúmeras fontes de biomassa que contém celulose, hemicelulose e lignina, as quais podem ser aproveitadas como substrato para crescimento de microrganismos, como o cultivo de fungos basidiomicetos. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), é produzido mundialmente em torno de 1,3 bilhões de toneladas de resíduos agroindustriais por ano, sendo um terço desse valor desperdiçado, não tendo utilidade ou utilidade comercial. Com isso, o reaproveitamento desses subprodutos, como

matéria prima para embalagens biodegradáveis, traz grandes vantagens comerciais e minimiza os impactos ambientais gerados pelo descarte indevido no meio ambiente (NASCIMENTO, 2020).

Logo é notável as vantagens ambientais e comerciais do uso das embalagens produzidas a partir de fungos. Além de trazer benefícios ao meio ambiente também é um diferencial à empresa que as usa, tendo comum vínculo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). As indústrias têm uma grande responsabilidade perante a sociedade e ao meio ambiente, e essas ações protetivas ao ecossistema refletem de forma positiva a seus consumidores e público global.

Empresas estrangeiras como a Biohm, Ecovative Design e MycoWorks já buscam essa evolução sustentável com a utilização do micélio em seus produtos, desenvolvendo alternativas decorativas, acústicas, de embalagens, construção, moda, entre outros. No Brasil, a startup Mush vem buscando a implementação dessas alternativas no mercado, fazendo o uso de recursos naturais para desenvolver materiais biodegradáveis a partir do fungo. O presente trabalho foi desenvolvido em conjunto com essa empresa, e suas inovações biotecnológicas auxiliaram no embasamento deste estudo. A Mush estabeleceu parceria para desenvolver embalagens de biocompósito fúngico para uma empresa, e os protótipos desenvolvidos no presente estudo foram nviados para análise e validação desse parceiro.

Dessa forma, esses materiais em desenvolvimento precisam ser testados quanto às suas propriedades, como uma alternativa de substituição às embalagens não ecológicas e uma forma de inserção eficaz das embalagens biodegradáveis feitas a partir do micélio de fungo. Para isso, no presente trabalho foram realizados testes físicos e mecânicos, a fim de avaliar a funcionalidade e viabilidade técnica dos biocompósitos e produzir os protótipos de embalagem.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterização física e mecânica de protótipos de embalagens secundárias produzidas com biocompósitos fúngicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Produzir corpos de prova utilizando o micélio fúngico com casca de arroz e serragem como substratos.

- Caracterizar o biocompósito fúngico por meio dos testes de densidade, absorção de água, compressão e inflamabilidade.

- Demonstrar a viabilidade de preparo e uso das embalagens de biocompósitos fúngicos, utilizando como substrato a serragem e a casca de arroz.

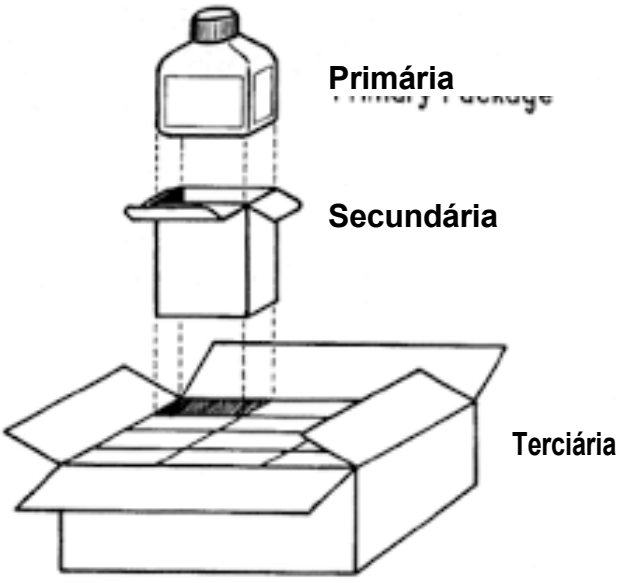
- Produzir protótipos de embalagens de biocompósitos fúngicos, utilizando como substratos serragem e casca de arroz.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Embalagens

O principal objetivo das embalagens consiste na proteção do produto no seu transporte e armazenamento, pois preserva o material de fatores ambientais como impactos, luz, umidade e microrganismos. De acordo com a Associação Brasileira de Embalagens (ABRE, 2014) há variados grupos de embalagens, e cada modelo atende a necessidade de uso de acordo com o produto final. As embalagens são classificadas em três principais grupos de acordo com sua finalidade, definidos como embalagens primárias, secundárias e terciarias (Figura 1). As primárias estão em contato direto com o produto; as secundárias envolvem e protegem a embalagem primária e as terciárias armazenam uma grande quantidade de embalagens secundárias, utilizadas geralmente na fase de transporte.

Figura 1: Classificação embalagens quanto a função



Fonte: Giovana Van Der Vinne Rosa (2017).

As embalagens secundárias podem ser consideradas de uso único, já que tem uma vida útil curta, tendo função única de proteger o produto primário, sem funcionalidade para reuso. Assim, são descartadas em maior volume por não terem função a longo prazo, gerando grande quantidade de lixo. De acordo com Daisy Bispo, coordenadora da Fundação Heinrich Böll (ATLAS DE PLÁSTICO, 2020), as embalagens de uso único comportam uma grande parcela de responsabilidade

referente a poluição plástica, em que 158 milhões de toneladas de plástico produzidas no mundo são utilizados nesse tipo de recipientes.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente alertou que a poluição plástica é uma ameaça crescente em todos os ecossistemas, sendo o plástico já considerado um problema climático. Os dados apontam que até o ano de 2050 o processo de produção dos plásticos irá emitir em torno de 6,5 gigatoneladas de CO_2, 15% do orçamento global de carbono, sendo considerada já uma crise de poluição mundial. Os autores alegam que a reciclagem destes plásticos não é mais uma alternativa à saída desta crise, sendo necessário abordagens com biomateriais circulares, de consumo e produção sustentável e uma cadeia de valor envolvida. Dessa forma, nota-se a importância da implementação de alternativas ecológicas à embalagem plástica, em que os biocompósitos fúngicos mostram ser uma ótima alternativa, tendo um ciclo de vida 100% ecológico e ainda condicionarem o solo na sua decomposição (PNUMA, 2021).

3.2 Biocompósitos

Os materiais que contém duas ou mais fases de origem natural são nomeados de biocompósitos, esses combinam fibras naturais com polímeros ou materiais inorgânicos, constituindo assim uma nova classe de materiais definidos como ecológicos. Nem todo biocompósito é biodegradável, como os misturados com uma matriz polimérica, como poliéster, resina e plástico. Os biomateriais produzidos a partir do micélio fúngico são consideradas um biocompósito e têm ganhado destaque também por serem materiais biodegradáveis, com propriedades de leveza, resistência e bioeficiência, assim podendo ser considerados embalagens fúngicas biodegradáveis (REAL, 2017).

Embalagens biodegradáveis tem rápida decomposição no ecossistema, sendo totalmente reabsorvidas pela natureza sem deixar resíduos e gerar impactos nocivos ao meio ambiente. Segundo a NBR 15448 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os materiais biodegradáveis podem ser digeridos pela ação de microrganismos, sendo os compostáveis degradados em no máximo 6 meses, gerando matéria orgânica útil na nutrição do meio ambiente. Assim, o tempo de decomposição dessas embalagens de fontes renováveis é de 6 a 12 meses, já as

embalagens convencionais podem levar até 200 anos para se decompor (NAIME, 2010).

Os biocompósitos fúngicos são produzidos por meio da inoculação de um fungo basidiomiceto em um determinado resíduo vegetal, que atua como substrato. Assim, há o crescimento do micélio fúngico sobre o substrato que é parcialmente consumido, formando o material compósito. Esse microrganismo se agrega as partículas do substrato e adquire o formato do recipiente em que for cultivado, formando assim a embalagem de interesse.

Nota-se então que a produção do biocompósito fúngico engloba as fases de inoculação do substrato; preparo da amostra em moldes; incubação e inativação do microrganismo em alta temperatura, essa sendo ideal para cada microrganismo. Deve-se levar em conta condições de umidade e temperatura do local de incubação, para ideal crescimento do micélio, sendo este favorecido em ambientes de alta umidade e temperatura ambiente (ROCHA et al., 2020).

Os materiais de biocompósitos fúngicos desenvolvidos pela empresa Mush, têm como vantagem apresentarem um ciclo 100% ecológico utilizando resíduos agrícolas como substrato, gerando um produto de interesse comercial que pode substituir ~~as~~ embalagens convencionais. Estas embalagens de biocompósitos fúngicos podem ser descartadas no solo, pois se comportam como condicionadores de solos, uma classificação anterior ao adubo. Além disso, é um produto carbono neutro, sem emissão extra de CO_2 na atmosfera, de acordo com a análise de ciclo de vida da empresa.

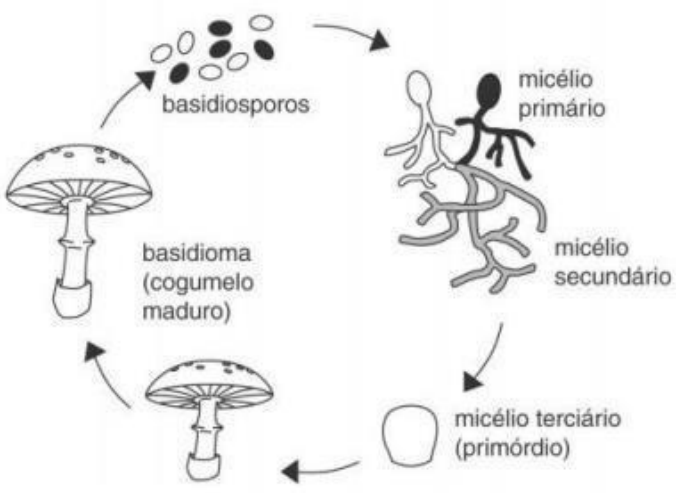
Com a crescente conscientização ambiental foram estabelecidas novas legislações e regras industriais para o consumo e produção consciente de materiais biodegradáveis, dessa forma o desenvolvimento dessas embalagens de biocompósitos biodegradáveis tem um grande foco para as indústrias. Esse interesse leva em conta também os benefícios da utilização de resíduos agroindustriais como fonte de substrato, no qual é gerado um valor agregado ao resíduo, como também uma alternativa ecológica de material para uso (KUBASKI; ITO, 2017 e MENDES et al., 2010).

3.3 Fungo

O fungo utilizado para a produção dos biocompósitos é um basidiomiceto, sendo esses caracterizados como fungos que formam basidiomas (frutificação), do reino fungi, classificados como seres eucariontes heterotróficos. Logo, são seres que se alimentam da matéria viva presente no solo por meio de enzimas digestivas, garantindo uma capacidade de degradar matéria orgânica de forma ecológica por serem basidiomicetos capazes de deteriorar principalmente celulose e lignina (XING et al., 2018).

Esse tipo de fungo se desenvolve por meio de esporos que germinam e formam as hifas, o conjunto de hifas é chamado de micélio. Para expandir a produção desses micélios é recomendado o uso de substratos ricos em nutrientes, para potencializar seu crescimento, que se desenvolve em camadas não superficiais do solo, assim não sendo exposto a luz e ar fresco. Em seguida ocorre a fusão de duas hifas de micélios geneticamente diferentes, gerando a fase de frutificação. Nesta fase o fungo já consumiu substrato suficiente para atingir a superfície, produzindo então seus frutos, chamados popularmente de cogumelos, sendo capazes de disseminar seus esporos, como ilustrado na Figura 2 (ROSA, 2006).

Figura 2: Ciclo de vida dos cogumelos



Fonte: ROSA (2006).

A fase micelial do ciclo de vida do cogumelo é a fase de interesse para a produção dos biocompósitos fúngicos. Essa fase é onde as hifas formam uma rede tridimensional que secreta enzimas, estas consomem os nutrientes do substrato e

produzem um material orgânico resistente, o qual preenche a superfície e interior do substrato com essa biomassa fúngica. Através dessa secreção enzimática, o micélio absorve as fontes de nutrientes do substrato, como carbono e nitrogênio, gerando uma resistência física no material por conta de sintetizar quitina em sua parede celular, um polímero de alta resistência e durabilidade (APPELS et al., 2019 e FERREIRA et al., 2018).

Outros fatores importantes da fase micelial do fungo é seu rápido desenvolvimento, devido seu consumo energético de substrato, que não gera nenhum resíduo. Também há espécies que podem produzir até três tipos de hifas, na qual confere maior resistência ao biocompósito, sendo essas espécies geralmente usadas para produção desses materiais. Alguns exemplos de cogumelos que se comportam dessa forma são as espécies *Trametes versicolor*, *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus* (JONES et al., 2017 e YANG et al., 2021).

O nome e definições de cultivo da espécie em estudo não serão divulgados por se tratar de um segredo industrial, sendo dados patenteados pela empresa Mush.

3.4 Propriedades físicas da embalagem fúngica

As embalagens devem possuir algumas características físicas importantes para seu melhor desempenho, como baixa absorção de água, baixa densidade, porém alta resistência a impactos, ser pouco inflamável e não degradar o meio ambiente. De acordo com Zeller e Zocher (2012), os biocompósitos fúngicos possuem, na sua maioria, propriedades físicas e mecânicas similares ou superiores ao poliestireno expandido (EPS), se diferenciando por serem biodegradáveis e não tóxicos.

Alguns fatores que afetam as propriedades desses biocompósitos são diferentes nutrientes, espécie do fungo e tipo de substrato consumido, alterando características como espessura da fibra do micélio, estrutura, superfície do material e densidade. Dessa forma, a escolha do substrato e seus nutrientes impacta nas propriedades do produto final, sendo possível selecionar a composição que melhor substitui as embalagens comuns, como a do Isopor® (EPS). Essas características são avaliadas a partir de testes mecânicos, que classificam o comportamento e resistência do material (YANG et al., 2021).

Os resíduos agroindustriais utilizados como base para compor o substrato para o crescimento fúngico do presente trabalho foram a casca de arroz e serragem.

3.4.1 Serragem

De acordo com Arima et al. (1999) as indústrias madeireiras produzem um grande volume de resíduos de madeira, em que 60 a 68% da madeira processada se torna resíduo (ARIMA, 1999). Anualmente são gerados em torno de 30 milhões de toneladas de resíduos de madeira no Brasil, sendo 91% dessa quantidade produzida pelas indústrias madeireiras, com instalações siderúrgicas situadas principalmente nos estados do Pará e do Maranhão (BIOMASSA BR, 2016).

Estados do Pará, Mato Grosso e Rondônia processam mais de 13,5 milhões de metros cúbicos de madeira por ano. Esse valor resulta em aproximadamente 5,5 milhões de resíduos sem destinação econômica, gerando graves problemas ambientais como fogo e fumaça (Assumpção, 2005).

A serragem é um dos subprodutos gerados a partir do corte da madeira e é formada pela passagem da tora nas serras de redução, na qual se produz um grande volume de partículas finas de madeira. Esse resíduo tem baixo interesse comercial pois tem um elevado grau de impurezas para o seu reaproveitamento, impossibilitando assim seu uso na formação de variados produtos à base de madeira (FAGUNDES, 2003 e CABREIRA, 2011).

Logo, um dos principais problemas desses resíduos para a indústria e meio ambiente consiste no seu grande volume de produção em conjunto com um baixo valor ao mercado. Formando um grande acúmulo desses resíduos nas indústrias, sendo necessário grandes espaços de armazenamento até a destinação final. No entanto, essa realidade não é possível para a maioria das empresas, que assim dispõe irregularmente essas sobras na fábrica, tornando o ambiente de trabalho insalubre e inadequado, ou então, realizam a queima ilegal desse material para se desfazer dele (SOUZA & MARTINS MARCOS, 2008). Essa queima da madeira tratada para comercialização libera compostos químicos que degradam o meio ambiente e a saúde humana, como o formaldeído que é tóxico e carcinogênico. Dessa maneira, é de grande importância e interesse comercial desenvolver alternativas para o reuso apropriado desse resíduo.

A serragem pode ser usada como um subproduto por ter na sua composição química 39,9% de glucanas, 20,5% de hemiceluloses (6,5% xilanas, 2,0% galactanas, 1,3% arabinanas, 10,7% mananas e 1,8% grupo acetil), e 31,4% lignina (STOFFEL, 2014). A hemicelulose tem a propriedades de rigidez por meio de ligações covalentes

com a lignina, ambas dando resistência à tração, diminuem permeabilidade ao vapor de água e dão consistência e estabilização à estrutura (OGATA, 2013). Além disso são ótimas fontes nutricionais para o crescimento de microrganismos, por serem ricas em carboidratos geradores de energia (CORREIA, et al., 2011). Sendo assim, nota-se que a serragem possui uma composição propícia para a estruturação e preparo de produtos que necessitam de resistência e baixa densidade, como é o caso das embalagens.

Por esse motivo, esse subproduto (serragem e casca de arroz) antes considerado um resíduo foi selecionado para testes, a fim de compor o substrato para o fungo e seu potencial interesse comercial à produção de biocompósitos, deixando de ser um material descartado para se tornar objeto de estudo e possível investimento com valor agregado (KRUYENISKI, 2019).

3.4.2 Casca de Arroz

O arroz é um dos produtos mais consumidos pela população mundial, sendo um dos principais grãos produzidos no mundo. O Brasil é o nono maior produtor do grão de arroz no mundo, sendo o estado com maior produção o Rio Grande do Sul, com 70,8% do total da safra nacional no ano de 2017, produzindo 12,3 milhões de toneladas (CONAB, 2018). Só esse estado gera (RS), anualmente, em torno de 2,2 milhões de toneladas do resíduo da casca de arroz (THOMA, 2019).

Na indústria manufatureira global do arroz é gerado em torno de 20% de resíduos da casca, em torno de 148,2 toneladas de resíduos (baseado nos dados de 2016), nos quais necessitam de uma correta destinação e tratamento, pois do contrário degradam o solo e ar (MAURO et al., 2018).

Os resíduos de casca de arroz na indústria nem sempre tem a destinação adequada, se tornando um problema ambiental devido seu longo período de deterioração para uso como adubo, e baixa intensidade calorífica para secagem. Além disso, a sua queima indevida gera elevadas quantidades de monóxido e dióxido de carbono (GUERRINI; TRIGUEIRO, 2004).

O resíduo de casca de arroz é a camada mais externa do grão e se forma quando a casca é separada do restante dos grãos pelos descascadores. A composição química desse substrato tem como principais compostos orgânicos 34% de celulose, 13% de hemicelulose e 20% de lignina (FOLETTO et al., 2005 & HICKERT, 2010). Como descrito no comportamento do substrato serragem, esses

componentes têm alta capacidade de estruturação do material e atuam como fonte de nutrientes aos microrganismos. Outro fator diferencial da casca de arroz é sua composição de sílica, em torno de 20%, pois ela é um componente capaz de aumentar a resistência da estrutura e diminuir a espessura de produtos como concreto (LIBÓRIO et al., 1998).

Dessa maneira, esse resíduo também possui grandes vantagens processuais e ambientais para compor o substrato na produção de biocompósitos. Então foi o selecionado para os testes do presente trabalho, a fim de contribuir para o desenvolvimento econômico, social e ambiental de forma sustentável.

3.5 Testes Físicos

Os testes físicos em materiais têm a finalidade de avaliar e caracterizar as propriedades mecânicas e estruturais, auxiliando na indicação para quais funções um material pode ser mais apropriado.

3.5.1 Teste de Densidade

O teste de densidade tem como objetivo a determinação da densidade aparente do material. Usualmente se usa a densidade de um sólido para determinar o material e suas possíveis mudanças físicas, indicando o grau de uniformidade da amostra e assim saber a densidade média da embalagem como um todo (ASTM, 2020).

Dessa maneira, a determinação da densidade permite uma avaliação da estrutura material, assim podendo relacionar seu peso, força, resistência e relação custo-peso. Analisar a densidade de um biocompósito é importante para determinar o peso aparente da embalagem e seu custo, assim quanto mais leve mais interessante para as propriedades de embalagem.

3.5.2 Teste de Absorção de água

O teste de absorção de água tem como objetivo a determinação relativa da taxa de absorção de água das embalagens de micélio, quando imersas em água, e também é relacionada indiretamente ao cálculo da porosidade. Uma das principais funções desse método é ~~n~~a determinação da proporção de água absorvida por esse material, definindo relações de umidade e propriedades de resistência mecânica,

dimensões ou aparência, como um guia para os possíveis efeitos e propriedades do material à exposição de água ou umidade (ASTM, 2018).

Desse modo, a determinação da porosidade e absorção de água desses materiais, consiste em um importante teste para garantir o devido controle de uniformidade do produto final. Para o biocompósito de embalagem fúngico é importante caracterizar sua absorção de umidade, pois certos produtos como perfumes e essências podem ter alta volatilidade e acabar afetando a estrutura do material, coloração e até fragrância do produto (BRIASCO, 2016).

3.5.3 Teste de Compressão

Esse método traz informações sobre as propriedades de compressão dos materiais, incluindo resistência, tensão e deformação máxima (ASTM, 2010).

Assim, a determinação da compressão garante um controle de qualidade do material, observando sua aceitação de acordo com as especificações e propósitos de uso. Para as embalagens, é de grande importância a definição desta propriedade, que aponta sua capacidade de empilhamento no transporte e proteção do produto a impactos.

3.5.4 Teste de Inflamabilidade

O teste de inflamabilidade caracteriza propriedades do material quando este entra em combustão, podendo avaliar os fatores que contribuem para essa inflamabilidade, intensidade de queima e tempo de combustão (UL, 2001).

Dessa forma, o comportamento do material exposto ao fogo tem fundamental importância para garantir sua qualidade, durabilidade e segurança pessoal, sendo possível avaliar se este segue os requisitos que a normativa UL94, para testes de inflamabilidade, exige como resistência e capacidade de extinguir a chama. Essa classificação para os biocompósitos é de grande valia por determinar a propagação da chama do material e seu tempo de combustão, para assim avaliar seu risco de inflamabilidade e então preparar os locais de armazenamento da forma correta, evitando acidentes.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Informações como nomenclatura do microrganismo, composição de meio de cultura, substrato e etapas específicas de produção foram mantidas em sigilo devido ao uso restrito desses dados pela empresa Mush. Dessa forma, nomeou-se o fungo cultivado como "*Fungo X*".

Nesse trabalho foram avaliadas as propriedades físicas dos biocompósitos fúngicos desenvolvidos a partir dos substratos serragem e casca de arroz. Ainda não há normas específicas para biocompósitos, por esse motivo foram utilizadas normas para materiais plásticos, estabelecidas pela American Society for Testing and Materials (ASTM), International Organization for Standardization (ISO) e Underwriters Laboratories Inc. (UL). Cada teste tem sua importância e finalidade na avaliação do compósito, sendo esses baseados nas normas ISO 845:2006 e C20 – 00 para densidade, D570 – 98 para absorção de água, D695 – 10 para compressão e UL 94 para inflamabilidade.

4.1 Microrganismo

A espécie *Fungo X* será obtida da empresa parceira deste projeto e mantida em placas de Petri contendo o meio de cultura Y, sob refrigeração.

4.2 Compósito

Os substratos de serragem e casca de arroz seguem a mesma metodologia de preparo, assim inicialmente o substrato foi moído e padronizado para obter a umidade e relação carbono/nitrogênio (C/N) ideais para o crescimento do fungo. Em seguida foi submetido a um processo de esterilização em autoclave a 121 °C por 1 hora. Após resfriar, foi inoculado o *Fungo X* neste substrato, em cabine de fluxo laminar e em seguida o substrato foi incubado em estufa BOD (Demanda Bioquímica de Oxigênio) a 25 °C por 7 a 14 dias. Após esse período, foi necessário a alocação deste compósito crescido nos moldes de corpos de prova, nas dimensões ideais de acordo com cada metodologia normativa usada (Densidade: com volume maior ou igual a 1cm3 com superfície e bordas lisas; Absorção de água: 76 mm de comprimento e 25,4 mm na largura longitudinal; Compressão: 12,7 mm de diâmetro por 25,4 mm de comprimento; Inflamabilidade: 125 mm de comprimento por 13 mm de largura). Em seguida, retornou o material moldado para a estufa BOD a 25 °C por mais 3 dias, o

retirou dos moldes, e por fim transferiu-o para uma estufa com alta temperatura (45 a 60 °C).

4.3 Testes Físicos

Os testes seguiram as normas estabelecidas pela "*American Society for Testing and Materials*" (ASTM) e "*International Organization for Standardization*" (ISO) para materiais plásticos e baseiam-se nas normas ISO 845:2006 e C20 – 00 para testes de densidade, D570 − 98 para testes de porosidade, D695 − 10 para compressão e a UL 94 para inflamabilidade.

4.3.1 Densidade

Inicialmente o teste de densidade seria realizado de acordo com a norma ASMT D792-20 para plásticos. No entanto, após algumas análises constou-se que o biocompósito não se adequa a essa técnica devido a suas características morfológicas. Esse biocompósito fúngico tem seu volume afetado ao entrar em contato com a água por apresentar uma alta absorção do líquido, se expandindo após a imersão. Também, o material tem uma densidade menor que da água e assim flutua ao ser colocado no aparato para teste (Fotografia 1), a norma instruí o uso de outro solvente menos denso, porém o material também é afetado por solventes orgânicos, influenciando assim na sua massa e resultado final.

Fotografia 1: Aparato para teste de densidade com material flutuando

Legenda: A) Corpo de prova flutuante, B) Aparato para teste.

Fonte: Autoria própria (2023).

Logo, a determinação da densidade aparente foi realizada pela razão entre massa e volume das amostras (g/cm^3), usando a abordagem de Arquimedes para densidade aparente, de acordo com a norma para sólidos ASTM C20 – 00 (2010). Assim, inicialmente foi pesado os corpos de prova na balança analítica, em seguida aferido com um paquímetro a largura, altura e profundidade do material e feito o cálculo do volume a partir desses valores. Por fim, com os valores de peso e volume de cada amostra, calculou-se a densidade aparente dos corpos de prova pela equação dada abaixo:

$$Dap = \frac{m}{v}$$

Onde:

m = massa

v = volume

4.3.2 Absorção de água

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais do departamento de física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa.

Foi possível utilizar os mesmos corpos de prova usados no teste de densidade descrito acima, assim logo após finalizar o procedimento com todos os corpos de prova do teste de densidade, foi necessário imergi-los novamente em água durante 24 horas, no dia seguinte retirá-los do líquido para pesar a massa úmida de cada unidade, removendo delicadamente o excesso de água com o auxílio de um papel.

Para o cálculo de absorção de água, a partir destas análises, foi utilizada a equação abaixo, dada em porcentagem:

$$Ab = \frac{\mathrm{Mu} - \mathrm{Ms}}{\mathrm{Ms}}\ x\ 100$$

Onde:

Ab = Absorção de água

Ms = massa seca

Mu = massa úmida

Para o cálculo da matéria solúvel perdida, os mesmos corpos de prova úmidos (peso condicionado) foram colocados em estufa por mais 24 horas para secagem, a fim de recondicionar o biocompósito e em seguida, pesados novamente (peso recondicionada). Então, foi utilizada a equação abaixo, dada em porcentagem:

$$MSP\ (\%) = \frac{Pc - Pr}{Pc} \times 100$$

Onde:

MSP = Matéria solúvel perdida

Pc = peso condicionado

Pr = peso recondicionado

A partir dos valores obtidos para o cálculo de densidade e absorção de água foi possível também calcular a porosidade aparente do material de forma indireta, dada pela equação abaixo, em porcentagem:

$$Pap = \frac{(Mu - Ms)}{(Mu + Mi)}\ x\ 100$$

Onde:

Pap = Porosidade aparente

Ms = massa seca

Mu = massa úmida

Mi = massa imersa

4.3.3 Compressão

Os testes de compressão foram realizados no Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não-Destrutivos do departamento de física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa. A máquina de ensaio é da marca EMIC modelo DL10.000.

Primeiramente foi medida a espessura e largura dos 5 corpos de prova cilíndricos de cada material, anotando essas informações. Em seguida foi definida a velocidade padrão da máquina de ensaios, em torno de 1,3 ± 0,3 mm/min (até 41.370 MPa) e então ajustar a amostra entre as superfícies da ferramenta de compressão, de forma alinhada ao centro. Ajustou-se os compressores até que estejam em contato sutil com o topo do corpo de prova, e o ensaio é iniciado. Então foi preciso coletar os registros do dispositivo de gravação automática presentes na máquina, como a carga máxima transportada pelo corpo de prova durante o teste e sua deformação de compressão, avaliando a curva-deformação completa. Repetiu-se o procedimento com todos os corpos de prova de cada material analisado.

As informações de resistência à compressão foram dadas automaticamente pela máquina de ensaio, sem haver a necessidade de cálculos e equações, sendo necessária apenas a análise dos gráficos e dados de tensão de compressão e deformação máxima para os resultados.

4.3.4 Inflamabilidade

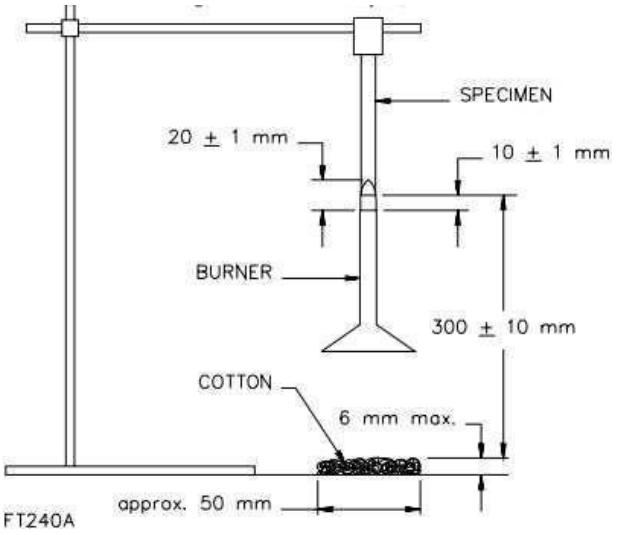
O teste de inflamabilidade tem como objetivo definir a resposta real ao calor e chama dos materiais em análise, assim qualificando as possibilidades de uso final desse compósito. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Métodos Analíticos

do departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia (DAEBB) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa.

Os corpos de prova devem ter formado padronizado com 125 ± 5 mm de comprimento por 13,0 ± 0,5 mm de largura e fornecidas no espessuras mínima e máxima, que não deve exceder a 13 mm. Além disso, as bordas devem ser lisas e o raio nos cantos não deve ser exceder 1,3 mm.

Para iniciar o processo foram pesados 5 corpos de prova no grampo do suporte, a 6 mm superiores deste material, como ilustrado na Figura 3, com o eixo longitudinal vertical, de modo que a extremidade inferior da amostra esteja 300 ± 10 mm acima de uma camada horizontal de não mais de 0,08 g de absorvente,100% algodão diluído em aproximadamente 50 x 50 mm e espessura máxima de 6 mm. Em seguida alocou-se o botijão de gás ajustado e também foi ajustado o bico de Bunsen para produzir uma chama azul de 20 ± 1 mm de altura. Aplicou-se a chama centralmente na borda inferior da amostra, de modo que a parte superior do queimador esteja 10 ± 1 mm abaixo da amostra. Foi mantida a chama nessa distância por 10 segundos. Então, foi retirada a amostra do queimador e simultaneamente se deu início a medição do tempo de pós-chama, chamado de t1 em segundos. Assim que cessou o pós-chama da amostra, colocou-a no queimador novamente e manteve o queimador a uma distância de 10 ± 1 mm da porção restante da amostra por mais 10 segundos. Repetiu-se esse mesmo processo, nomeando tempo de pós chama (t2) e de pós-luminescência (t3) e registrou seus valores.

Figura 3: Estrutura teste vertical de inflamabilidade



Fonte: UL 94/2001.

Os resultados analisados foram o tempo de pós-chama à primeira aplicação do material a chama (t1), o tempo de pós-chama após segunda aplicação na chama (t2) e o tempo de pós-luminescência após aplicação da segunda chama também (t3). Também foi analisado se as amostras queimaram até o grampo de retenção e se gotejaram no indicador algodão.

4.4 Protótipo de embalagem

O desenvolvimento e preparo de protótipos de embalagem tiveram como finalidade a comprovação da eficácia e uso final do biocompósitos fúgicos como embalagens secundárias biodegradáveis. Assim, foi possível visualizar o produto final e sua viabilidade de uso, após todos os testes efetuados.

Para o preparo do protótipo foi utilizada uma moldura plástica em formato genérico de um frasco de perfume. Preparou-se o substrato de casca de arroz e serragem como já descrito, todo o processo de produção da embalagem foi feito dentro de uma cabine de fluxo laminar, realizada no Laboratório de Fermentações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Ponta Grossa.

Inicialmente foi higienizado o molde com álcool 70% e o esterilizou na luz UV por 15 minutos. Em seguida foi depositado o substrato selecionado (casca de arroz e/ou serragem) no molde, fazendo pressão para compactar todo esse resíduo fúngico dentro da forma, até ser preenchido por completo. Logo após, o molde foi levado para a estufa BOD a 25 °C por 3 dias, e após esse período foi retirado o material crescido dos moldes. Por fim, foi transferida a embalagem crescida para uma estufa com alta temperatura (45 a 60 °C) para inativar o crescimento fúngico, retirar a umidade da embalagem e consequentemente enrijecê-la estando assim pronta para uso.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Produção de corpos de prova

O fungo apresentou crescimento satisfatório em ambos os substratos testados (casca de arroz e serragem), pois teve um rápido e uniforme crescimento micelial (3 dias), sem frutificações e amarelamentos, possíveis de avaliar na Fotografia 2 e também nos protótipos finais, exposto na Fotografia 7. O desenvolvimento micelial foi maior na superfície dos biocompósitos de serragem, tendo uma superfície mais densa e homogênea em comparação ao corpo de prova de casca de arroz, em que o substrato ficou mais aparente no material.

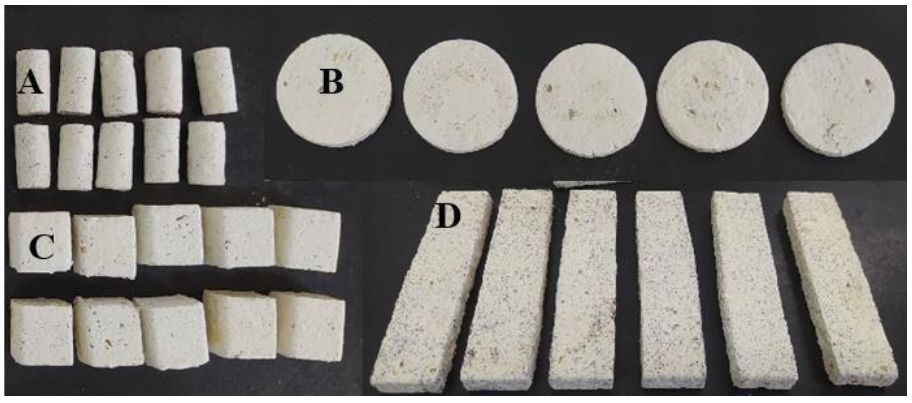
Os corpos de prova para os testes físicos seguiram as dimensões estabelecidas pelas normas de cada ensaio realizado, especificadas na Tabela 1, sendo ilustrado na Fotografia 2 a aparência final desses corpos de prova no geral.

Tabela 1: Dimensões dos corpos de prova.

Corpo de Prova	Formato	Dimensões
Compressão	Cilíndrico	25,4 mm altura 12,7 mm diâmetro
Absorção de água	Cilíndrico	25,3 mm altura 12,8 mm diâmetro
Densidade	Cúbico	20 mm lado
Inflamabilidade	Retangular	125 mm comprimento 30 mm largura 13 mm espessura

Fonte: Autoria própria (2023).

Fotografia 2: Corpos de prova para os testes físicos.



Legenda: A) resistência à compressão, B) absorção de água, C) densidade e D) inflamabilidade.
Fonte: Autoria própria (2023).

5.2 Testes físicos

Para os testes físicos foram utilizados 5 corpos de prova para cada ensaio e os resultados foram obtidos a partir de média aritmética e desvio padrão. Os valores obtidos para cada teste se encontram na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados gerais dos testes físicos.

	Substrato	
Teste físico	Serragem	Casca de arroz
Densidade aparente (g/cm^3)	0,31 ± 0,04	0,45 ± 0,01
Absorção de água (%)	117,16 ± 2,27	64,84 ± 4,35
Matéria solúvel (%)	11,01 ± 0,59	1,04 ± 0,37
Porosidade (%)	38,58 ± 5,07	29,86 ± 1,46
Resistência a compressão:		
Tensão de compressão (MPa)	4,31 ± 0,78	14,69 ± 3,77
Força máxima (N)	463,73 ± 84,11	1717,11 ± 441,12
Deformação máxima (%)	5,19 ± 1,13	3,53 ± 0,26
Inflamabilidade	V1	V0
Tempo de produção		
Crescimento micelial (dias)	3	3
Estufa (dias)	2	2

Legenda: Os valores representam a média das amostras ± desvio padrão da amostra.

Fonte: Autoria própria (2023).

5.2.1 Densidade

O teste físico para a determinação da densidade aparente do biocompósito envolveu a razão entre massa do corpo de prova e seu volume aferido por um paquímetro, onde ambos os substratos utilizados apresentaram um material com densidade abaixo de 1 g/cm³. De acordo com os resultados, expostos na Tabela 2, a densidade aparente para o biocompósito de serragem foi de 0,31 g/cm^3, já para o de casca de arroz foi de 0,45 g/cm^3, portanto o resíduo de casca de arroz compõe o biomaterial mais denso.

Dessa maneira, os biocompósitos feitos a partir do substrato de serragem apresentaram maior quantidade de poros (38,56% para serragem e 29,86% para casaca de arroz) assim tendo um menor peso e densidade aparente em relação a casca de arroz, consequentemente esse produto tem um menor custo no transporte, fator esse de grande impacto para o uso direcionado às embalagens. Também, as embalagens secundárias feitas a partir do substrato de serragem tem um maior

interesse comercial até comparadas ao papelão, material também muito utilizado como embalagem desse segundo nível. De acordo com Silva e Santos (2009), o papelão apresenta uma densidade aparente de 0,338 g/cm^3, assim ele tem um custo de transporte maior que o da serragem em relação a peso.

5.2.2 Absorção de água

Os biocompósitos fúngicos são materiais que absorvem água por terem uma estrutura porosa (38,56% para serragem e 29,86% para casaca de arroz), consequentemente esses materiais também têm uma alta absorção de água. Além disso, apresentam uma fração de matéria solúvel em sua composição, avaliando este fator através do teste de recondicionamento, no qual a serragem teve 11,01% de matéria solúvel e a casca de arroz 3,34%. Essa análise foi feita após o teste de imersão (Fotografia 3), sendo recondicionado o peso (seco) do biocompósito e o considerando como matéria solubilizada, somados a absorção de água resultante.

De acordo com os resultados da análise elencados na Tabela 2, os biocompósitos produzidos com serragem tem maior absorção de água (117,16%) quando comparados com os de casca de arroz (64,84%).

Fotografia 3: Teste de absorção de água

Fonte: Autoria própria (2023).

5.2.3 Compressão

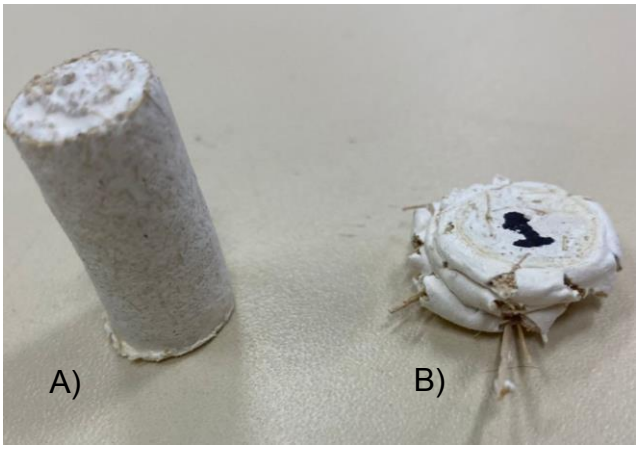
A resistência à compressão é definida como o ponto máximo de tensão que o corpo de prova suporta antes de seu rompimento, calculada a partir da força máxima e área transversal do material. O teste é efetuado por meio de uma deformação linear do corpo de prova a partir de uma força comprimindo esse material, como mostrado na Fotografia 4.

Os resultados dos testes de resistência a compressão estão apresentados na Tabela 2. Através dos resultados da força de tensão e deformação máxima, avaliou-se que o biocompósito produzido com casca de arroz tem maior resistência a compressão (14,69 MPa) e menor deformação máxima (3,53%), em relação a serragem (4,31 Mpa e 5,19%). Na Fotografia 5 é possível observar que ambos os corpos de prova testados não apresentaram ruptura, se compactando a um corpo mínimo. Portanto, a casca de arroz apresenta maiores vantagens de conservação às características do material no seu transporte e empilhamento

Fotografia 4: Ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Autoria própria (2023).

Fotografia 5: Corpo de prova antes e após o teste de compressão.



Legenda: A) Corpo de prova antes do teste de compressão, B) Corpo de prova comprimido até sua deformação máxima.
Fonte: Autoria própria (2023).

5.2.4 Inflamabilidade

O teste de inflamabilidade foi efetuado por meio da queima vertical dos corpos de prova, como ilustrado na Fotografia 6, e os valores de tempo de queima obtidos foram classificados em V0, V1 ou V2, explicados no Quadro 1.

Quadro 1: Critérios de classificação inflamabilidade dos biocompósitos fúngicos.

Critérios	V0	V1	V2
Valores individuais de t1 e t2 para os 5 corpos de prova	<10s	<30s	<30s
Somatória de t1+t2 para os 5 corpos de prova	<50s	<250s	<250s
Valores individuais de t3	<30s	<60s	<60s
Queima do algodão por gotas ou fagulhas emitidas	Não	Não	Sim

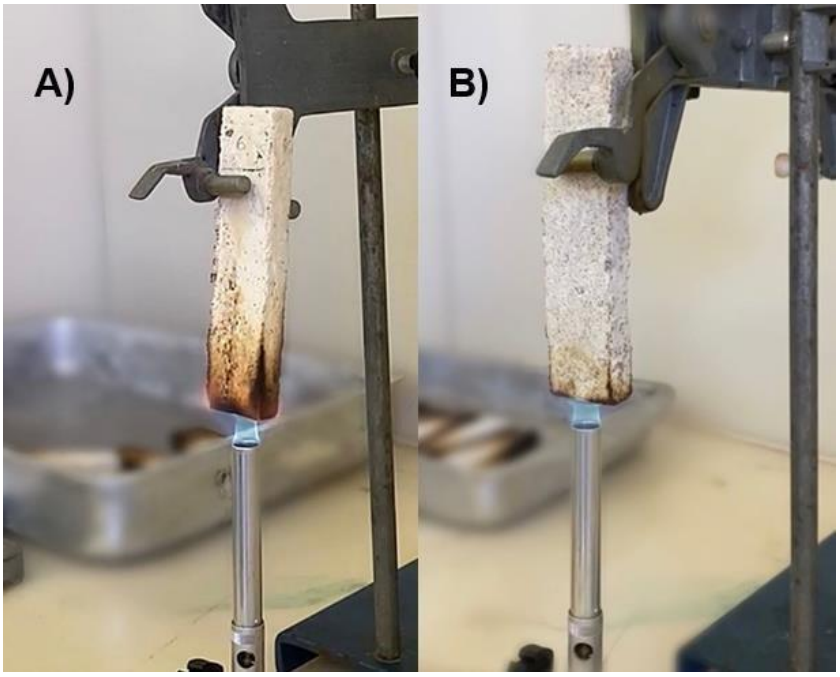
Fonte: UL 94 (2001).

De acordo com os resultados do ensaio, expostos na Tabela 3, ambos os biocompósitos estudados não expressam propagação de chama por gotejamento, porém os materiais com serragem apresentam um tempo mais longo para a extinção da chama (V1), em comparação a casca de arroz (V0). Pode-se analisar também a

irradiação de fumaça provinda da queima dos corpos de prova, no qual a casca de arroz teve menor emissão em comparação com o de serragem.

Em relação aos materiais convencionais, os bicompósitos de serragem e casca de arroz são mais eficientes e seguros, como por exemplo ao material EPS (poliestireno expandido). O EPS tem classificação V2 por ter alta velocidade de propagação de chama, com gotejamento, sendo o grupo de materiais mais perigosos em relação a inflamabilidade (ISÓFERES, 2023). Também a irradiação de fumaça dos biocompósitos testados e seu tempo de propagação e extinção da chama são muito menores, sendo mais seguros.

Fotografia 6: Teste de inflamabilidade por queima vertical.



Legenda: A) Corpo de prova com serragem, B) Corpo de prova com casca de arroz.

Fonte: Autoria própria (2023).

Tabela 3: Resultados dos testes de inflamabilidade dos biocompósitos fúngicos.

Substrato	T1	T2	T3	(T1 + T2)	Queima do algodão	Classificação
Serragem	6,57	28,37	22,57	34,93	Não	V1
Casca de arroz	0,00	0,00	14,48	0,00	Não	V0

Legenda: T1: tempo para extinção da chama após a 1ª aplicação de chama por 10 s, T2: tempo para extinção da chama após a 2ª aplicação de chama por 10 s, T3: tempo para extinção da incandescência.

Fonte: Autoria própria (2023).

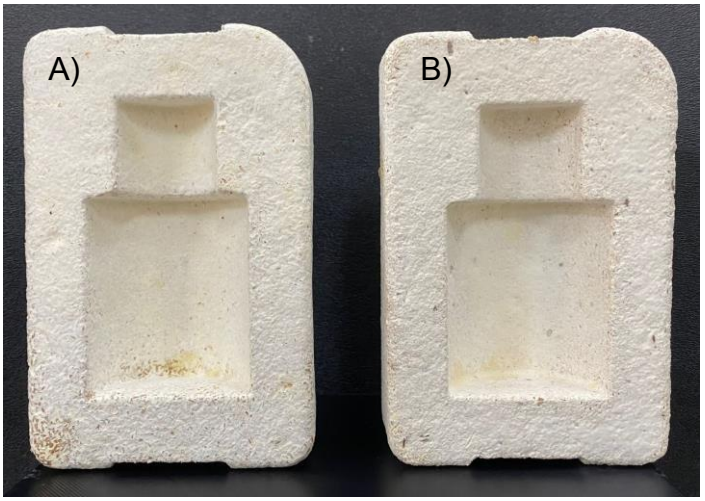
5.3 Protótipo de embalagem

Os protótipos de embalagens desenvolvidos com substrato de serragem e casca de arroz tiveram um ótimo crescimento micelial, por ter uma cobertura completa e uniforme do substrato, sem frutificações e amarelamentos, com rápido crescimento de aproximadamente 3 dias e estando pronto pra uso em 5 dias totais (Tabela 2). Ambos apresentaram as mesmas características de estrutura, mas com aparência visual diferentes, porém não comprometendo a estética e utilidade do material (Fotografia 7).

Esses protótipos também foram enviados à empresa parceira, a qual validou e aprovou seu modelo e estrutura para uso como embalagem secundária. Essa empresa sugeriu a adição de componentes como camomila na composição do material, para diminuir o aroma característico do micélio no material. Assim, será dada continuidade nessa produção com as sugestões propostas, para então comercializar o material.

Assim, ambos os protótipos testados (serragem e casca de arroz) têm viabilidade para uso como embalagens secundárias de biocompósito fúngico. Dessa forma, tendo êxito nas duas matérias primas, não há influência significativa na escolha do melhor material, em relação ao resultado estético aparente.

Fotografia 7: Protótipos de embalagem de biocompósito fúngico.



Fonte: Autoria própria (2023).

Legenda: A) Embalagem com casca de arroz, B) Embalagem com serragem.

Logo, é possível notar, de acordo com a caracterização física dos testes efetuados nos materiais de serragem e casca de arroz, que ambos os materiais apresentam estrutura satisfatória para uso como embalagens secundária, além de terem capacidade de aplicação em diferentes setores por sua versatilidade de fabricação em variados formatos. Para uso como embalagem secundária no geral, o principal fator para a escolha do material é seu peso/custo e assim a embalagem de serragem apresenta-se como mais vantajosa nessa seleção, por ter uma menor densidade e assim menos custos no transporte e no valor unitário por gramatura (custo/peso). No entanto, a decisão do material para uso cabe a cada empresa e consumidor, de acordo com sua finalidade de uso, em cada característica física tem seu impacto e importância de acordo com as propriedades requeridas a cada objetivo de uso. Como por exemplo o uso da casca de arroz para biocompósitos que devem prezar por maior resistência, segurança a inflamabilidade e menor absorção de água.

A fim de demonstrar essa vantagem ambiental, os biocompósitos fúngicos foram comparados ao poliestireno expandido (EPS ou Isopor®), sendo esse um dos polímeros mais consumidos de acordo com Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2013), onde das 100 mil toneladas produzidas por ano, apenas 34,5% do material é reciclado no país (PLASTIVIDA, 2017).

O EPS comum, classificado como do tipo 1, tem densidade aparente de 0,01 g/cm^3 e tensão por compressão de 0,033 MPa (KNAUF ISOPOR®, 2018). Porém, apesar da densidade aparente deste material ser menor em comparação aos biocompósitos produzidos no presente trabalho (0,31 g/cm^3) ele tem uma menor resistência a compressão em relação a esses biomateriais (14,69 MPa) e gera mais impactos ambientais. O EPS gera grande impacto após seu descarte, por não ser biodegradável e não se desintegrar na natureza, tendo tempo indeterminado de decomposição. Além disso, esse material se transforma em um microplástico na sua quebra, capaz de absorver uma grande quantidade de compostos químicos tóxicos, como mercúrio, chumbo, pesticidas e agrotóxicos (POMPÊO, et al.; 2022). Esses componentes intoxicam a cadeia alimentar dos animais terrestres e marinhos, como também sua incineração libera gases causadores do efeito estufa. Para os humanos, o material é nocivo quando exposto a raios ultravioletas, se tornando um ótimo meio de proliferação de bactérias e vírus patogênicos (eCycle, 2019). Também, para uso como embalagem, o EPS tem uma inflamabilidade perigosa, entrando em combustão

extremamente rápido, emitindo fagulhas e gotejamento (V2), com uma alta irradiação de fumaça.

Dessa forma, é possível notar os impactos negativos que uma das embalagens plásticas mais usadas no mundo (Isopor®) gera ao meio ambiente, sendo uma prioridade do governo e empresas privadas a implementação de alternativas mais ecológicas e biodegradáveis.

6 CONCLUSÃO

A caracterização física e mecânica dos biocompósitos fúngicos com os diferentes resíduos testados (serragem e casca de arroz), mostrou que a casca de arroz tem menor absorção de água e porosidade, maior resistência a compressão e menor risco de inflamabilidade, em comparação a serragem. Já a serragem apresentou melhor resultado de densidade, sendo menos densa que a casca de arroz e assim tem um menor custo por peso no transporte.

Apesar das diferenças nos resultados dos testes físicos e mecânicos, os protótipos das embalagens de biocompósitos fúngicos, em ambos os substratos testados, apresentoram viabilidade de produção e de uso como embalagem secundária.

A empresa parceira nesse projeto recebeu as duas amostras dos protótipos de embalagem e validou a produção com o substrato de serragem, tendo assim uma resposta positiva a esses biocompósitos fúngicos. Dessa maneira, os próximos passos para a continuidade do trabalho, com os resultados obtidos, serão a produção desses protótipos em escala industrial, após validar todos as sugestões da empresa, necessidades e demandas de produção.

REFERÊNCIAS

ALVES, Tatianny Soares et al. Inflamabilidade de nanocompósitos de polipropileno/argila organofílica. Polímeros, v. 24, p. 307-313, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D570 − 98: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. Estados Unidos, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D695 − 10: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Estados Unidos, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D792 – 20: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Estados Unidos, 2020.

APPELS, Freek VW et al. Fabrication factors influencing mechanical, moisture-and water-related properties of mycelium-based composites. Materials & Design, v. 161, p. 64-71, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. (2013). Perfil 2013. São Paulo. Disponível em: < http://www.abiplast.org.br/site/estatisticas > Acesso em 31 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS – ABRE. (2014). Estudo macroeconômico da embalagem. São Paulo. Disponível em: < http://www.abre.org.br/setor/dadosde-mercado/ > Acesso em 31 jan. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15448: Embalagens plásticas degradáveis e/ou de fontes renováveis, 2008.

ASSUMPÇÃO, O.F. Sistemas isolados. Ambiente Brasil. Disponível em < http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/artigos/sistemas_isolados.html > Acesso em 23 de fevereiro de 2005.

BIOMASSA BR. Os resíduos de madeira gerados anualmente no Brasil são estimados em 30 milhões de toneladas, 2016. Disponível em: <https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/os-residuos-de-madeira-gerados-anualmente-no-brasil-sao-estimados-em-30-milhoes/20160211-103419-x618> Acesso em 06 mai. 2023.

BRIASCO, Benedetta et al. Packaging evaluation approach to improve cosmetic product safety. Cosmetics, v. 3, n. 3, p. 32, 2016.

CABREIRA, Mariane Pires. Classificação de resíduos de serraria e seu potencial de utilização. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Florestal, Universidade Federal do Pampa - São Gabriel, 2011.

Com pandemia, produção de embalagens cresce 0,5%, na contramão da indústria em geral. ABRAE, março, 2021. Disponível em: < https://www.abre.org.br/inovacao/com-pandemia-producao-de-embalagens-cresce-05-na-contramao-da-industria-em-geral/> Acesso em 31 nov. 2023.

CORREIA, D. S., SANTOS, F. H. R., SOARES, L.H.B., CORREIA, M. E. F. Enzimas oxidativas microbianas envolvidas na biodegradação da lignocelulose: produção, características bioquímicas e importância biotecnológica. EMBRAPA Agrobiológica. 34 p. 2011.

DO NASCIMENTO, Viviane et al. Resíduos agroindustriais: uma alternativa promissora e sustentável na produção de enzimas por microrganismos agroindustrial. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA AGROINDÚSTRIA. 25 a 27 de set., 2020, Recife. UFPE – PE, 2020.

E-commerce brasileiro tem melhor faturamento dos últimos anos em janeiro. Neotrust, abril, 2022. Disponível em: <https://neotrust.com.br/2022/04/08/e-commerce-brasileiro-tem-melhor-faturamento-dos-ultimos-anos-em-janeiro/>. Acesso em 11 set. 2022.

EQUIPE eCycle, 2019. Isopor é útil, mas tem grande impacto ambiental. Disponível em:< https://www.ecycle.com.br/eps-isopor/ > Acesso em 21 fev. 2023.

FAO (Food and Agriculture Organization). Desperdício de alimentos tem consequências no clima, na água, na terra e na biodiversidade. Disponível em: http://www.fao.org.br/daccatb.asp. Acesso em: 11 set. 2022.

FERREIRA, Gerci Aprijo et al. Análise comparativa de glicanas e quitinas da parede celular de espécies de Trichoderma e a relação desses polissacarídeos no pareamento com fitopatógenos. 2018.

FOLETTO, E. L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R. S.; PORTUGAL, U. L.; JAHN, S. L. Aplicabilidade das cinzas da casca do arroz. Química Nova, São Paulo, v. 28, n. 06, p. 1055- 1060, 2005.

FUNDAÇÃO HEINRICH BÖLL (2020). Atlas do plástico: Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. 1ed. Rio de Janeiro, Brasil. Lupa. pg. 16.

GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca do arroz carbonizada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 06, Viçosa, p. 1069-1076, 2004.

HICKERT, L. R. Otimização da hidrólise da casca de arroz (Oryza sativa) e a avaliação da capacidade de bioconversão deste hidrolisado a etanol e xilitol por leveduras. 2010. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola e do Meio Ambiente) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

HILLIG, E. et al. Resíduos de madeira da indústria madeireira–caracterização e aproveitamento. Anais do XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, v. 26, p. 7, 2006.

Instituto Socioambiental de Plásticos – PLASTIVIDA. São Paulo, fevereiro 2017. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/index.php/sala-de-imprensa/noticias/593-mais-de-30-mil-toneladas-de-isopor-reciclado?lang=pt > Acesso em 21 fev. 2023.

ISOFERES, Comércio e Representações Ltda. Comportamento do Poliestireno Expandido EPS ao fogo. Disponível em: < https://isoporecia.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Comportamento-do-EPS-ao-fogo.pdf > Acesso em 09 de abr. 2023.

JONES, Mitchell et al. Mycelium composites: a review of engineering characteristics and growth kinetics. Journal of Bionanoscience, v. 11, n. 4, p. 241-257, 2017.

KNAUF ISOPOR®. Mais utilidades e vantagens do que você pode imaginar, 2018. Disponível em: < https://www.knauf-isopor.com.br/produtos/servicos-em-inovacao/eps /> Acesso em 28 de abr. 2023.

KRUYENISKI, Julia et al. Physical and chemical characteristics of pretreated slash pine sawdust influence its enzymatic hydrolysis. Industrial Crops and Products, v. 130, p. 528-536, 2019.

KUBASKI, Luana Aparecida; ITO, Paula Bauto. Desenvolvimento de embalagem biodegradável a partir de resíduos da indústria de batata e cerveja. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LIBÓRIO, Jefferson Benedicto Libardi et al. Sílica da casca de arroz em concreto de alto desempenho. 1998, Anais. Poços de Caldas: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998. Acesso em: 31 out. 2022.

Materials for Parts in Devices and Appliances. Northbrook, 2001.

MATHUROS, Fon. More Plastic than Fish in the Ocean by 2050: Report Offers Blueprint for Change. World Economic Forum, 19 de Janeiro de 2016. Disponível em https://www.weforum.org/press/2016/01/more-plastic-than-fish-in-the-ocean-by-2050-report-offers-blueprint-for-change/. Acesso em: 11 set. 2022.

MENDES, R.F.; MENDES, L.M.; ABRANCHES, R.A.S.; Santos, R.C. dos; JÚNIOR, J.B.G. Painéis aglomerados com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. Scientia Forestalis, v.38,n.86, p.285-295, 2010.

MURARO, Pérsio; DE OLIVEIRA CAMELO, Caeverton; DENIS, Fabiula Arenhardt. Aproveitamento e valorização da casca de arroz: uma revisão bibliométrica. VI Simpósio Ciência do Agronegócio, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2018.

NAIME, N. Embalagens ativas de fonte. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de tecnologia nuclear - materiais) – Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2010.

OGATA, Bruna Harumi. Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PINHEIRO, Bruno Carlos Alves et al. Reaproveitamento de resíduos industriais: transformando problema em educação ambiental e inovação. Revista Mediação, n. 12, 2021.

PINTO, Laís Soares Diniz; MATOS, Cynthia Casagrande; DA SILVA, Márcia Luiza França. Resíduos sólidos de madeira: aplicabilidade de resíduo de serragem de mdf no design de ambientes. Blucher Design Proceedings, v. 2, n. 9, p. 4253-4262, 2016.

POMPÊO, Marcelo; RANI-BORGES, Bárbara; PAIVA, Teresa Cristina Brazil. Microplásticos nos ecossistemas: impactos e soluções. Instituto de biociências – IB/USP, Universidade de São Paulo São Paulo, 2022.

REAL, Luís E. Pimentel. BIOCOMPÓSITOS. UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA A CONSTRUÇÃO. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 2017.

Relatório da ONU sobre poluição plástica alerta sobre falsas soluções e confirma necessidade de ação global urgente. PNUMA, 21 de outubro, 2021. Disponível em: < https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/relatorio-da-onu-sobre-poluicao-plastica-alerta-sobre > Acesso em 31 jan. 2023.

ROCHA, Maria Isabel et al. Desenvolvimento de biocompósitos fúngicos utilizando resíduos industriais. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, 2020.

RODRIGUES, Rafaela et al. Efeito da lignina em filmes biodegradáveis: uma breve revisão. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 12, n. 2, 2020.

ROSA, L. H. Cultivo do “Cogumelo do sol”. Dossiê técnico: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC, 2006.

SANTOS, Iris Sterfanie. Caracterização e análise mecânica de biocompósito de matriz micelial e reforço vegetal para uso como material biodegradável. 2020.

SILVA, Michele Chagas da; SANTOS, Gemmelle Oliveira dos. Densidade aparente de resíduos sólidos recém coletados. 2009.

SILVA, Vera Lúcia Dias Da. Comportamento Mecânico e de Flamabilidade de Compósito de Polipropileno Reciclado com Fibra de Coco e Hidróxido de Alumínio. 2006. 119 f. Dissertação do Departamento de Engenharia Mecânica, UFPA, Belém, 2006.

STOFFEL, Romina B. et al. Optimization of sequential alkaline–acid fractionation of pine sawdust for a biorefinery. Industrial Crops and Products, v. 61, p. 160-168, 2014.

SUBCOMMITTEE, A. S. T. M. Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water. ASTM International, 2000. Reapproved (2017), pp. 20-22.

THOMA, Ana Laura Santos. Reaproveitamento da casca de arroz. Universidade Federal de Santa Maria UFSM, 2019. Disponínel em: < https://ufsm.br/r-779-600> Acesso em 06 mai. 2023.

UNDERWRITERS LABORATORIES INC. UL 94: Test for Flammability of Plastic XING, Yangang et al. Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. In: IOP conference series: earth and environmental science. IOP Publishing, 2018. p. 022032.

YANG, L.; PARK, D.; QIN, Z. Função material do biocompósito à base de micélio: uma revisão. Frontier in Materials. v. 8, 2021.

YANG, L.; PARK, D.; QIN, Z. Função material do biocompósito à base de micélio: uma revisão. Frontier in Materials. v. 8, 2021.

ZELLER, P.; ZOCHER, D. Ecovative’s breakthrough biomaterials. Fungi Magazine, 5(1):51-56, 2012.