

UNIVERSIDADE DA REGIÃO DE JOINVILLE – UNIVILLE
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

**PRODUÇÃO DE BIOCMPÓSITOS de *Pleurotus sajor-caju* UTILIZANDO PAPEL
CARTÃO REVESTIDO COM PET**

NICOLE FERNANDA SOUZA

JOINVILLE, SC

2022

NICOLE FERNANDA SOUZA

**PRODUÇÃO DE BIOCAMPÓSITOS de *Pleurotus sajor-caju* UTILIZANDO PAPEL
CARTÃO REVESTIDO COM PET**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Processos, na Universidade da Região de Joinville.
Orientadora: Dra. Elisabeth Wisbeck.

JOINVILLE, SC

2022

Catálogo na publicação pela Biblioteca Universitária da Univille

S729p	<p>Souza, Nicole Fernanda Produção de biocompósitos de Pleurotus sajor-caju utilizando papel castão revestido com PET / Nicole Fernanda Souza; orientadora Dra. Elisabeth Wisbeck. – Joinville: UNIVILLE, 2022.</p> <p>77 f.: il.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos – Universidade da Região de Joinville)</p> <p>1. Compostos bioativos. 2. Pleurotus sajor-caju. 3. Papel cartão. 4. Plástico nas embalagens. I. Wisbeck, Elisabeth (orient.). II. Título.</p> <p>CDD 628.44</p>
-------	--

Termo de Aprovação

“Produção de Biocompósitos de Pleurotus sajor-caju utilizando Papel Cartão revestido com Poli (tereftalado de etileno) - PET”

por

Nicole Fernanda Souza

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck
Orientadora (UNIVILLE)

Dr. Nelson Liçardí Junior
(UFSC)

Profa. Dra. Mariane Bonatti Chaves
(UNIVILLE)

Dissertação julgada para a obtenção do título de Mestra em Engenharia de Processos, área de concentração Desenvolvimento e Gestão de Processos e Produtos e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos.



Profa. Dra. Elisabeth Wisbeck
Orientadora (UNIVILLE)



Profa. Dra. Ana Paula Testa Pezzin
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

Joinville, 13 de dezembro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Antonia Martins Souza e Denis Souza por não medirem esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

À professora Dra. Elisabeth Wisbeck pela orientação deste trabalho, ensinamentos e confiança.

À professora Dra. Cynthia Hering Rinnert pela orientação no estágio docente, carinho e motivação na vida acadêmica.

À professora Dra. Denise Abatti pelo ensinamento, incentivo e apoio técnico.

Aos colegas de sala Mauro Júnior e Gabriel Roberge pelos momentos e conhecimentos compartilhados.

À responsável técnica Aline Scheller Coan pelo suporte, ensinamentos e impulsionamento nas atividades de laboratório.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela oportunidade de realizar o mestrado por meio do apoio financeiro de bolsa de estudo.

Aos professores, pesquisadores e funcionários da UNIVILLE que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos, meus sinceros agradecimentos,

Nicole Fernanda Souza

RESUMO

Nos últimos anos, estudos visando o aproveitamento e agregação de valor aos resíduos vem sendo realizados. Em 2020, a indústria da embalagem teve aumento de 22,3% de valor bruto da sua produção em relação ao ano anterior, o que resulta no aumento da geração desses resíduos. Uma alternativa para o reaproveitamento desse material lignocelulósico, seria utilizá-lo na produção de biocompósitos com micélio fúngico atuando como ligante das partículas do substrato. A produção dos biocompósitos fúngicos ocorre de maneira espontânea, pelo crescimento biológico, tornando o processo de baixo custo e resultando num resíduo orgânico. Com isso, objetivou-se nesse trabalho a produção de biocompósitos por *Pleurotus sajor-caju* aplicando como substrato embalagens de papel cartão SBS (*Solid Bleached Sulfate*) revestidas com PET (Poli (Tereftalato de Etileno)), verificando a influência da fração de inóculo 30 e 50% e da metodologia de secagem, convencional ou à vácuo, a 60 °C. Para cada condição teste foi avaliado o tempo de crescimento micelial, o teor de umidade, a velocidade de secagem, a resistência à compressão, absorção de umidade do ar e absorção de água, e análise termogravimétrica, a fim de definir a melhor condição de cultivo. As condições determinadas para a produção dos biocompósitos foram 50% de inóculo e secagem em estufa convencional, pois apresentaram menor tempo de processo (14 dias), maior resistência à compressão (0,16 MPa), absorção de umidade em média U_{ar} de $4,6 \pm 1,1\%$, maior velocidade de secagem (5,58 g/dia), estabilidade térmica (331,04 e 356,46 °C) e densidade aparente de 325 kg/m³. Os biocompósitos cultivados apresentaram potencial para serem aplicados como substituintes ao poliestireno expandido (EPS), devido a resistência à compressão obtida para o biocompósito ter valor semelhante ao EPS tipo 5, além de serem materiais seguros, que dispõem de alta resistência à temperatura e de fácil degradação.

Palavras-chave: Biocompósitos, *Pleurotus sajor-caju*, micélio fúngico, papel cartão SBS, PET, resíduos de embalagens plásticas.

ABSTRACT

Production of biocomposites from *Pleurotus sajor-caju* using paperboard coated with PET.

In recent years, studies aiming at the use and addition of value to waste have been carried out. In 2020, the packaging industry had an increase of 22.3% in the gross value of its production compared to the previous year, which results in an increase in the generation of this waste. An alternative for the reuse of this lignocellulosic material would be to use it in the production of biocomposites with fungal mycelium acting as a binder for substrate particles. The production of fungal biocomposites occurs spontaneously, through biological growth, making the process low cost and resulting in an organic residue. Thus, the objective of this work was the production of biocomposites by *Pleurotus sajor-caju* using SBS (Solid Bleached Sulfate) paperboard packages coated with PET (Poly (Ethylene Terephthalate)) as substrate, verifying the influence of the inoculum fraction 30 and 50% and the drying methodology, conventional or vacuum, at 60 °C. For each test condition, the mycelial growth time, moisture content, drying speed, compressive strength, moisture absorption from the air and water absorption, and thermogravimetric analysis were evaluated in order to define the best cultivation condition. The conditions determined for the production of biocomposites were 50% inoculum and drying in a conventional oven, as they presented a shorter process time (14 days), greater resistance to compression (0.16 MPa), moisture absorption on average Uar of $4.6 \pm 1.1\%$, higher drying speed (5.58 g/day), thermal stability (331.04 and 356.46 °C) and apparent density of 325 kg/m³. The cultivated biocomposites showed potential to be applied as substitutes for expanded polystyrene (EPS), due to the compressive strength obtained for the biocomposite having a similar value to EPS type 5, in addition to being safe materials, which have high resistance to temperature and are easy to degradation.

Key words: Biocomposites, *Pleurotus sajor-caju*, fungal mycelium, SBS paperboard, PET, plastic packaging waste.

RESUMEN

Producción de biocomposites a partir de *Pleurotus sajor-caju* utilizando carton recubierto PET.

En los últimos años se han llevado a cabo estudios que apuntan al aprovechamiento y valorización de los residuos. En 2020, la industria de envases tuvo un incremento del 22,3% en el valor bruto de su producción respecto al año anterior, lo que se traduce en un incremento en la generación de estos residuos. Una alternativa para la reutilización de este material lignocelulósico sería utilizarlo en la producción de biocompuestos con micelio fúngico actuando como aglutinante de las partículas del sustrato. La producción de biocompuestos fúngicos ocurre espontáneamente, a través del crecimiento biológico, lo que hace que el proceso sea de bajo costo y que dé como resultado un residuo orgánico. Así, el objetivo de este trabajo fue la producción de biocompuestos por *Pleurotus sajor-caju* utilizando como sustrato envases de cartón SBS (*Solid Bleached Sulfate*) recubiertos con PET (Poli (Tereftalato de Etileno)), verificando la influencia de la fracción de inóculo 30% y 50% y la metodología de secado, convencional o al vacío, a 60 °C. Para cada condición de prueba, se evaluaron el tiempo de crecimiento del micelio, el contenido de humedad, la velocidad de secado, la resistencia a la compresión, la absorción de humedad del aire y del agua, y el análisis termogravimétrico para definir la mejor condición de cultivo. Las condiciones determinadas para la producción de biocompuestos fueron 50% de inóculo y secado en estufa convencional, ya que presentaron menor tiempo de proceso (14 días), mayor resistencia a la compresión (0,16 MPa), absorción de humedad en promedio Uar de $4,6 \pm 1,1\%$, mayor velocidad de secado (5,58 g/día), estabilidad térmica (331,04 y 356,46 °C) y densidad aparente de 325 kg/m³. Los biocompuestos cultivados mostraron potencial para ser aplicados como sustitutos del polietileno expandido (EPS), debido a que la resistencia a la compresión obtenida por el biocompuesto tiene un valor similar al del EPS tipo 5, aparte de ser materiales seguros, que tienen alta resistencia a la temperatura y fácil degradación.

Palabras clave: Biocompuestos, *Pleurotus sajor-caju*, micelio fúngico, cartón SBS, PET, residuos de envases plásticos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição do papel cartão SBS revestido com poli (tereftalato de etileno) (PET).

Figura 2 – Sínteses de obtenção do poli (tereftalato de etileno) (PET).

Figura 3 – a) Morfologia dos fungos Basidiomicetos; b) Hifa e c) Parede celular da hifa.

Figura 4 – Ciclo de vida dos fungos Basidiomicetos.

Figura 5 – Diagrama ilustrativo do cultivo micelial para a base de biocompósitos.

Figura 6 – Produtos feitos de micélio fúngico. a) Adidas Stan Smith Mylo; b) Bolsa de couro de cogumelo da marca Hermès;

Figura 7 – Roupas de Mylo criadas por McCartney.

Figura 8 – a) Jardim Circular, estrutura arquitetônica feita de cogumelos por Carlo Ratti Associati; b) Growing Pavilion, espaço de evento temporário.

Figura 9 – Refúgio fúngico da oficina Superpraxis.

Figura 10 – Matriz de *Pleurotus sajor-caju*.

Figura 11 – Grãos de trigo inoculados com micélio de *Pleurotus sajor-caju*: a) Antes da incubação; b) Após a incubação.

Figura 12 – Fluxograma dos ensaios e condições experimentais realizados nos biocompósitos fúngicos.

Figura 13 – Substrato de embalagem de papel cartão SBS revestida de PET: a) Antes do picote; b) Após o picote.

Figura 14 – Pacotes com o substrato colonizado pelo micélio fúngico.

Figura 15 – Moldeiras com o substrato processado antes e depois da recolonização e restabelecimento das hifas.

Figura 16 – Tempo de crescimento micelial e tempo total do processo de produção dos corpos de prova do material biocompósito no substrato com 30 e 50% de inóculo.

Figura 17 – Curvas de secagem, massa (g) x tempo (horas), dos biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo a secagem em estufa convencional e à vácuo.

Figura 18 – Corpos de prova (% de inóculo e metodologia de secagem): a) 30% em estufa à vácuo; b) 30% em estufa convencional; c) 50% em estufa à vácuo; d) 30% em estufa convencional.

Figura 19 – Sorção de água (A%) em 2, 24 e 48 h de imersão dos biocompósitos com 30% e 50% de inóculo secos em estufa convencional (C) e em estufa à vácuo (V).

Figura 20 - Umidade do ar (Uar %) por tempo de exposição (dias) nos biocompósitos produzidos com 30% (a) e 50% (b) de inóculo e secos 60 °C em estufa convencional e à vácuo. As linhas na coloração vermelha e cinza referem-se à medida da temperatura ambiente (°C) e da umidade relativa do ar (URar%), respectivamente, no momento da pesagem.

Figura 21 - Tensão de compressão para os corpos de prova dos biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* e secos em estufa à vácuo e convencional.

Figura 22 – Valores médios de densidade aparente para os corpos de prova dos biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo e secos em estufa à vácuo e convencional.

Figura 23 – Curvas TG para os biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* e secos em estufa à vácuo e convencional.

Figura 24 – Curvas DTG para os biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* e secos em estufa à vácuo e convencional.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Valores médios de teor de umidade inicial \pm dp (%) e final (em andamento), velocidade média de secagem \pm dp (g/dia) e tempo de secagem (dias) dos corpos de prova produzidos com 30 e 50% de inóculo e secos à 60 °C em estufa convencional e a vácuo.

Tabela 2 – Comparação da sorção de água para diferentes biocompósitos com micélio fúngico secos em estufa convencional.

Tabela 3 – Dados da análise termogravimétrica dos biocompósitos cultivados no substrato de papel cartão SBS revestido com PET com 30 e 50% de inóculo e secos em estufa convencional e à vácuo.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resíduos e tempo de decomposição.

Quadro 2 – Referências baseadas em biocompósitos fúngicos.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A%	Percentual de absorção de água
AbsU _{ar} %	Percentual de absorção de umidade do ar
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRE	Associação Brasileira de Embalagens
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANOVA	Análise de variância
ANPC	Associação Nacional dos Produtores de Cogumelos
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AT	Ácido tereftálico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
d	Densidade
d _p	Desvio Padrão
DMT	Dimetil Tereftalato
DTG	Primeira derivada da análise termogravimétrica
EG	Etilenoglicol
EPS	Poliestireno expandido
F	Força de compressão
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
m	Massa
M ₁₀₅ °C	Massa após a secagem a 105 °C
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
M _f	Massa final
M _i	Massa inicial
M _t	Massa medida a cada tempo de amostragem
NBR	Norma Brasileira
PCR	Pós-consumo Reciclado
PEBD	Polímero de Baixa Densidade
PET	Poli (Tereftalato de Etileno)

PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
RDC	Resolução de Diretoria Colegiada
t_c	Tempo de crescimento micelial
SBS	<i>Solid Bleached Sulfate</i>
SNS	Secretaria Nacional de Saneamento
TPA	Ácido Tereftálico
TDA	Trigo Dextrose Ágar
TGA	Análise termogravimétrica
U_{ar} (%)	Percentual de sorção de umidade
$U_f\%$	Teor de umidade final
$U_i\%$	Teor de umidade inicial
v	Velocidade média de secagem
V	Volume
σ_c	Tensão de compressão

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	17
3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE EMBALAGENS.....	19
3.2.1 Embalagens de Papel Cartão SBS	21
3.2.2 Poli (Tereftalato de Etileno) (PET).....	23
3.3 FUNGOS E O GÊNERO <i>PLEUROTUS</i>	25
3.4 COMPÓSITOS, BIOCMPÓSITOS E BIOCMPÓSITOS FÚNGICOS.....	28
3.5 PROCESSO DE SECAGEM CONVENCIONAL	35
3.6 PROCESSO DE SECAGEM À VÁCUO.....	35
4. METODOLOGIA	36
4.1 MICRORGANISMO E MANUTENÇÃO	36
4.2 PREPARO DO INÓCULO	37
4.3 PRODUÇÃO E ANÁLISES DOS BIOCMPÓSITOS	38
4.3.1 Substrato de papel cartão SBS revestido com PET	38
4.3.2 Preparo dos corpos de prova dos biocompósitos.....	39
4.3.3 Secagem dos corpos de prova dos biocompósitos	40
4.3.4 ANÁLISES DOS BIOCMPÓSITOS	41
4.3.4.1 Influência da imersão em água	42
4.3.4.2 Influência da umidade do ar	42
4.3.4.3 Resistência à compressão	43
4.3.4.4 Análise termogravimétrica (TGA)	44
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	65

INTRODUÇÃO

O consumo de embalagens é considerado um dos fatores que promove o crescimento da atividade econômica e desenvolvimento de um determinado território de acordo com a modernização da sociedade, que usufrui cada vez mais de produtos industrializados, acondicionados em embalagens oriundas de diversos processos químicos e que resultam no aumento da geração de resíduos sólidos (LANDIM *et al.*, 2016). Conforme o estudo macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo (ABRE), o valor bruto da produção física de embalagens no país atingiu cerca de R\$ 92,9 bilhões em 2020, representando um aumento de 22,3% em relação a 2019, que foi R\$ 75,9 bilhões. Inclusas à produção física de embalagens por classes, as embalagens de plástico e papel/papelão ondulado se destacaram com crescimento em sua produção de 6,8% e 1,0%, respectivamente. Esse aumento se deu por influência das principais indústrias de bens de consumo como alimentos, farmacêuticos, limpeza e perfumaria (ABRE, 2021).

As embalagens podem ser de metal, plástico, isopor, vidro ou papel, sendo classificadas em embalagens rígidas, semi-rígidas ou flexíveis (CUNHA, 2011). Na indústria do papel, encontra-se a categoria de papel cartão SBS (*Solid Bleached Sulfate*), normalmente aplicado a embalagens do ramo farmacêutico, cosmético e alimentício. A combinação do papel cartão SBS revestido por PET é comumente aplicada na produção de bandejas termoformadas, armazenando alimentos semiprontos e possibilitando a variação de temperatura entre -40 °C e 220 °C e ainda, tornou-se uma das embalagens mais usadas no mercado devido seu baixo custo e alto desempenho (ITO, 2009). Embora possuam vantagens, apresentam dificuldades de manuseio desses resíduos devido seu revestimento com polímeros (FERREIRA *et al.*, 2020). Estimou-se que, aproximadamente 40 toneladas/mês de resíduo sólido de papel cartão constituído por celulose e poli (tereftalato de etileno), foram gerados só em indústrias gráficas (FERRI, 2015).

Diante deste cenário, ressalta-se a ideia de consumo sustentável, unindo o desenvolvimento econômico e a proteção ao meio ambiente, de modo que as necessidades da sociedade sejam atendidas (KENIG-WITKOWSKA, 2017). Uma alternativa para o aproveitamento dos resíduos de embalagens seria utilizá-los como

substrato para a produção de biocompósitos fúngicos, produzidos pela inoculação de um fungo filamentoso em um substrato composto de um material nutriente e de partículas descontínuas. O fungo metabolizará o material nutritivo durante um período suficiente para o crescimento de suas hifas e permitirá que estas formem uma rede micelial interconectada no meio e em torno do substrato, ligando assim as partículas do material e assumindo o formato do recipiente em que será cultivado (BAYER *et al.*, 2008), podendo, dessa forma, substituir embalagens de madeira, plástico, espuma e isopor (ECOVATIVE, 2015).

No processo, o material deve ser desidratado para cessar o crescimento fúngico, desenformado e não deverá existir qualquer esporo fúngico ativo que possa vir a contaminar o meio ambiente. A grande vantagem deste material é que é praticamente 100% biodegradável após sua utilização, com decomposição rápida em solo, inclusive nos quintais domésticos (BAYER *et al.*, 2008). Estes biocompósitos são considerados eco materiais pois são programados especificamente para minimizarem efeitos adversos aos ecossistemas. Entre vários exemplos, estão os materiais naturalmente atóxicos, materiais fabricados a partir do reaproveitamento de resíduos cumulativos no ambiente, materiais que substituam outros de impacto ambiental negativo ou que possam ser reciclados ou reaproveitados, de forma harmônica com a natureza e com a vida (FERREIRA *et al.*, 2007).

Os fungos do gênero *Pleurotus*, juntamente com outros fungos formam um grupo denominado de “fungos de podridão branca”, por produzirem um micélio branco e degradarem tanto a lignina como a celulose. Para tanto, possuem um complexo enzimático lignocelulósico único com enzimas como celulase, ligninase, celobiase, lacase e hemicelulase que fazem com que estes fungos degradem uma grande variedade de resíduos lignocelulósicos (CHANG e MILES, 2004).

Com o objetivo de buscar soluções para os problemas ambientais ligados ao acúmulo de resíduos, estudos foram realizados a fim de avaliar a degradação de materiais poliméricos por fungos do gênero *Pleurotus*. Faria *et al.* (2015), ao avaliarem a biodegradação de poli (tereftalato) de etileno (PET) reciclado por *Pleurotus ostreatus*, observaram após 45 dias de biodegradação uma perda de massa de 3,3%. Já, Dambrós *et al.* (2014) avaliaram a biodegradação por 150 dias de PET por *Pleurotus djamor* e verificaram crescimento micelial sobre o material polimérico com perdas de massa em torno de 0,9%. Miers *et al.* (2020), avaliaram a

produção de biocompósitos contendo 20 e 30% de inóculo e secos a 40 e 60 °C, resultando em biocompósitos produzidos com 20% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* apresentando melhores condições de processo utilizando papel cartão SBS revestido com PET.

Nesse viés, comprovando que o substrato possui potencial para o cultivo de *Pleurotus* e que o micélio fúngico pode agir como ligante das partículas do resíduo propõe-se a produção e avaliação de biocompósitos de *Pleurotus sajor-caju* a partir do papel cartão SBS revestido com PET. O presente trabalho visa o aproveitamento e agregação de valor aos resíduos provenientes da indústria da embalagem, utilizando-se das habilidades apresentadas pelos fungos, contribuindo para a redução do desperdício de matérias-primas e dos impactos ambientais.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a produção de biocompósitos por *Pleurotus sajor-caju* aplicando como substrato embalagens de papel cartão SBS (*Solid Bleached Sulfate*) revestidas com PET (Poli (Tereftalato de Etileno)).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter biocompósitos fúngicos com 30 e 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* utilizando resíduos de papel cartão SBS revestido com PET como substrato e secagem dos biocompósitos em estufa convencional e à vácuo a 60 °C.
- Caracterizar e avaliar os biocompósitos em tempo de produção dos corpos de prova (dias), velocidade de secagem (g/dia), absorção de umidade de água (%), absorção de umidade do ar (%), resistência à compressão (MPa), análise termogravimétrica (TGA).
- Definir qual a fração de inóculo, 30 ou 50%, e qual a condição de secagem, convencional ou a vácuo, resulta em biocompósitos com melhores propriedades físicas.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A sociedade moderna vem enfrentando desafios relacionados a elevada geração de resíduos sólidos (EFING e PAIVA, 2016). A preocupação mundial diante dessa situação é crescente de acordo com o processo de industrialização, crescimento urbano acelerado, novos hábitos de vida e consumo, que potencializam a deposição inadequada dos resíduos e intensificam a exploração de recursos naturais (FERREIRA, 2020). Além disso, a mídia incentiva e influencia o consumidor a desejar produtos cada vez mais modernos, descartando os anteriores, aumentando assim, a disposição de resíduos (FERREIRA *et al.*, 2016; EFING e PAIVA, 2016). Diante deste cenário, ressalta-se a ideia de consumo sustentável, unindo o desenvolvimento econômico e a proteção ao meio ambiente, de modo que as necessidades da sociedade sejam atendidas (KENIG-WITKOWSKA, 2017).

Segundo a NBR 10.004, os resíduos sólidos são definidos como “[...] resíduos nos estados sólidos ou semissólidos, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”. De acordo com a norma citada, os resíduos sólidos podem ser classificados em resíduos classe I, que corresponde aos perigosos e classe II, não perigosos, que é subdividido em classe II A – não inertes e resíduos classe II B – inertes. Os resíduos são classificados de acordo com a identificação do processo ou atividade que os originaram, assim como, o potencial de risco ao ambiente e a saúde pública.

Dados apresentados no Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos pela Secretaria Nacional de Saneamento (SNS), mostram que existem 5.018 unidades de processamento de resíduos em operação no Brasil e 92,7 milhões de toneladas de massa de resíduos sólidos disponíveis, sendo apenas 65,3 milhões de toneladas para unidades de disposição no solo: aterro sanitário (48,2 milhões de toneladas), lixão (9,6 milhões de toneladas) e aterro controlado (7,6 milhões de toneladas). Foram recuperados e destinados para reciclagem, em média, 510 toneladas de resíduos sólidos. Em 2020, conforme o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2021), em decorrência da pandemia da COVID-19 boa parte das atividades humanas centralizaram-se em ambientes doméstico, impactando diretamente na produção e descarte de resíduos.

Na reciclagem, a região sudeste é a líder no ramo, sendo 141 mil toneladas destinadas ao processo, seguida pelas regiões sul, com 103,5 mil toneladas de resíduos comercializados, centro-oeste com 39,3 mil, nordeste com 25,3 mil, e norte, com 17,6 mil de toneladas. A diferença da distribuição pode ser consequência de características como volume populacional, nível de urbanização e nível de atividade econômica, bem como políticas públicas de fomento à categoria de catadores, que criam melhores condições de trabalho e estimulam a sua organização coletiva. As cooperativas e associações de catadores obtiveram um faturamento de R\$ 159 milhões com a venda dos materiais para reciclagem, sendo o papel predominante em quantidades comercializadas por tipo de material reciclável (52% do total recuperado) e quanto à proporção do faturamento por material vendido, a comercialização de plásticos possui a maior participação do Brasil (44% do total faturado) (ANCAT, 2021).

Os resíduos sólidos industriais geraram anualmente cerca de 98 milhões de toneladas, sendo que do total, 96% corresponderam a resíduos não perigosos e 4% a resíduos perigosos (IPEA, 2012). Conforme o Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais do IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), desde o ano de 2012 não são identificados dados atualizados referente à quantificação de resíduos sólidos industriais no Brasil devido a inexistência de um inventário nacional e de alguns inventários estaduais, como no caso do estado de Santa Catarina. Dessa forma, impossibilita-se a determinação do quanto é gerado atualmente pelas atividades industriais, dificultando tomadas de decisões do poder público por medidas que favoreçam a sustentabilidade (IPEA, 2020).

Associado ao aumento de lucros, empresas vem se interessando por linhas de pesquisa na produção de novos materiais, como a fabricação de “produtos verdes” e práticas sustentáveis comerciais, o que integra a substituição de materiais não-biodegradáveis por degradáveis, a reciclagem e reuso dos produtos, a redução nas cadeias de suprimento, consumo de energia e emissões atmosféricas. Ainda, a variedade dos resíduos sólidos industriais demanda a inovação de tratamentos específicos, o que implica na instalação da gestão desses resíduos dentro das fábricas e cumprimento das leis (CARVALHO *et al.*, 2015; BRAGA JUNIOR *et al.*, 2016).

Com isso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, Lei nº 12.305/10 (BRASIL, 2010a) é o instrumento que reúne o conjunto de princípios, objetivos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado desses resíduos disponíveis. As pessoas físicas ou jurídicas que desenvolvem atividades que resultam em geração de resíduos, como também todas aquelas que apresentam responsabilidade direta ou indireta pela geração de resíduos sólidos, estão submetidas ao cumprimento da referida Lei (BRASIL, 2010).

3.2 RESÍDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE EMBALAGENS

Dentre os resíduos sólidos, destacam-se os resíduos de embalagens. De acordo com a RDC nº 259, de 20 de setembro 2002 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), as embalagens são definidas como “recipiente, pacote ou embalagem destinada a garantir a conservação e facilitar o transporte e manuseio dos alimentos”. Podem ser divididas em subdivisões como: embalagem primária ou envoltório primário, que mantém contato direto com o alimento; embalagem secundária ou pacote, destinada a conter a(s) embalagem (ns) primária(s); e, embalagem terciária ou embalagem, destinada a conter uma ou várias embalagens secundárias (BRASIL, 2002). No Inventário Nacional dos Resíduos Sólidos Industriais (Resolução CONAMA nº 313/2002), anexo II, tem-se o grupo A006 que abrange os resíduos de papel papelão e o A007 resíduos de plásticos polimerizados de processo, ambos classificados como resíduos não perigosos.

As indústrias de embalagens, conforme comitê de meio ambiente e sustentabilidade da Associação Brasileira de Embalagem (ABRE), devem ser adequadas segundo normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ISO TR 14.062/2014. As indústrias de embalagens devem integrar aspectos ambientais ao desenvolvimento do seu produto a partir redução do consumo de matéria-prima, água e energia, processos fabris mais eficientes, redução da geração de resíduos industriais, estímulo à inovação e criatividade, substituição de componentes ou substâncias que contenham materiais poluidores e tóxicos, entre outros, sem prejudicar o desempenho da embalagem.

O valor bruto da produção física de embalagens no Brasil atingiu cerca de R\$ 92,9 bilhões. Inclusas à produção física de embalagens por classes, as embalagens de plástico e papel/papelão ondulado se destacaram com crescimento em sua produção de 6,8% e 1,0%, respectivamente. Esse aumento se deu por influência das principais indústrias de bens de consumo, como a de alimentos, por exemplo (ABRE, 2021). As embalagens de produtos alimentícios podem ser de metal, plástico, isopor, vidro ou papel, sendo classificadas em embalagens rígidas, semi-rígidas ou flexíveis. No Quadro 1 é apresentado o tempo de decomposição, quando os resíduos de embalagens são deixados no meio ambiente.

Tempo de decomposição de resíduos	
Alumínio	200 a 500 meses
Embalagens longa-vida	Até 100 anos
Isopor	Indeterminado
Papel e papelão	Cerca de 6 meses
Plásticos (embalagens e equipamentos)	Até 450 anos
Vidros	Indeterminado

Quadro 1 – Resíduos e tempo de decomposição.

Fonte: Adaptado de Cunha (2011).

A gestão dos resíduos de embalagens se baseia nos 3R's da sustentabilidade: Redução na origem, Reutilização e Reciclagem. A redução na origem consiste na diminuição do uso de materiais e energia, e, supressão da utilização de substâncias nocivas na produção e transformação das embalagens. A reutilização, no retorno das embalagens à indústria, reduzindo emissões de gases de efeito estufa, na geração de resíduos sólidos, barateando o custo operacional (consumo de matéria-prima) e no consumo de energia e água. A reciclagem consiste no processamento dos resíduos das embalagens para fabricar outras embalagens ou outros objetos, trazendo vantagens como a redução na quantidade de resíduos industriais, na exploração de recursos naturais, no consumo de energia elétrica e na poluição ambiental, assim como também, geração de novos empregos e expansão de negócios relacionados à reciclagem (JORGE, 2013).

O Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 (BRASIL, 2010b), além de regulamentar a Lei nº 12.305/10, institui o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa e compõe a PNRS, considerando a

responsabilidade compartilhada e encadeada dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de embalagens e produtos comercializados em embalagens, pela estruturação, implementação e operação do sistema de logística reversa das embalagens pós-consumo que compõem a fração seca dos resíduos urbanos ou equiparáveis, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

3.2.1 Embalagens de Papel Cartão SBS

Na indústria do papel, encontra-se a categoria de papel cartão SBS (*Solid Bleached Sulfate*) (Figura 1), normalmente aplicada a embalagens do ramo farmacêutico, cosmético e alimentício, que contém pelo menos 80% de polpa de celulose virgem e branqueada, e quando revestida por resinas, beneficia-se por vasta aplicação industrial. Possui grande importância no setor de embalagens para alimentos e bebidas devido à boa superfície de impressão e a possibilidade de revestimento, potencializando sua aplicação nos processos industriais (PACKAGING DIGEST, 2016).

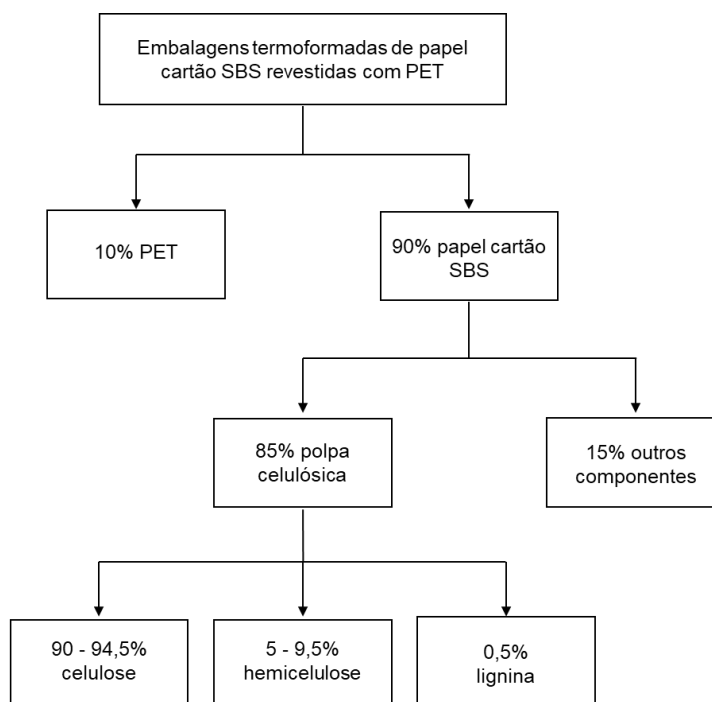


Figura 1 – Composição do papel cartão SBS revestido com poli (tereftalato de etileno) (PET).

Fonte: Adaptado de Ferri (2015).

A combinação do papel cartão SBS revestido por PET é comumente aplicada na produção de bandejas termoformadas, armazenando alimentos semiprontos e, possibilitando a variação de temperatura entre -40 °C e 220 °C e se tornaram uma das opções de embalagens mais usadas no mercado devido seu baixo custo e alto desempenho (ITO, 2009). A aplicação do PET na indústria brasileira de embalagens corresponde a 71% sendo que 32% do mercado nacional de polímeros tem o PET aplicado em embalagens carbonatadas (ABIPLAST, 2020).

Embora possuam suas vantagens, as embalagens de papel cartão SBS dificultam seu manuseio devido o revestimento com polímero (SRIDACH; HODGSON; NAZHAD, 2006; YANG *et al.*, 2017). Sabe-se que aproximadamente 40 toneladas/mês de resíduo sólido de papel cartão constituído por celulose e poli (tereftalato de etileno), foram geradas só em indústrias gráficas (FERRI, 2015). Diante da distinção de componentes na composição das embalagens, sua destinação pode ser o processo de reciclagem, que acontece em várias etapas, assim como ocorre com as embalagens Tetra Pak.

Na reciclagem, fardos das embalagens são dispostas em um equipamento chamado hidrapulper, que a maioria das fabricantes de papel possuem, onde, os produtos serão triturados e misturados com água para dissolução e separação do papel dos outros componentes, restando uma massa de fibras celulósicas que será lavada e purificada para confecção de novos papeis, considerando que 75% da composição é de papel. Ainda em hidrapulper, ocorre o processo de limpeza do polietileno e alumínio para retirada do restante de celulose. Seguidamente, o polietileno-alumínio passa por peneira rotativa para drenar a água, sendo posteriormente destinados à: 1) venda para indústrias de componentes, onde será transformada em algum produto de interesse; 2) ou, para empresa recicladora servindo de matéria-prima para transformação de plásticos; 3) ou, para indústria recicladora para transformação através de reator de plasma térmico, onde o polietileno se torna parafina para diversos usos e o alumínio é transformado em lingotes e vendido para outra indústria de interesse (CUNHA, 2011; NEVES 2004; AGENDA SUSTENTÁVEL, 2009).

3.2.2 Poli (Tereftalato de Etileno) (PET)

Em 1941, o poli (tereftalato de etileno) foi criado por dois químicos britânicos, John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, mas só a partir de 1950, iniciou-se sua produção em alta escala nos EUA e Europa, principalmente pela influência no ramo têxtil. Em 1970, deu-se início a aplicabilidade na fabricação de embalagens. Ano que também, em território brasileiro, começou-se a comercialização da resina do PET e que, em 1993, a resina passou a ter grande utilidade no mercado de embalagens, notadamente para os refrigerantes (ROMÃO *et al.*, 2009; ABIPET, 2012). Os polímeros são constituídos de origem natural ou sintética, compostos por repetidas unidades químicas (AKCELRUD, 2007), dispondo de uma estrutura parcialmente alifática e aromática, semicristalina (KARAGIANNIDIS *et al.*, 2007). Polímeros de origem petroquímica podem vir a potencializar impactos ambientais negativos quando descartados de maneira incorreta, por serem fundamentalmente inertes e não biodegradáveis (ZIEGLER *et al.*, 2016).

O poli (tereftalato de etileno), conhecido como PET, é um polímero termoplástico, capaz de ser reprocessado diversas vezes, voltando a se solidificar após o término do processo e suportando essa aplicação sem mudanças significativas nas suas propriedades básicas (BARBOSA *et al.*, 2016). Além disso, integra as embalagens de papel cartão SBS e é um polímero de baixa densidade (PEBD) cujas principais vantagens são baixo peso, baixo custo, alta resistência mecânica, alta resistência a corrosão, moldabilidade, maleabilidade e flexibilidade, conformidade com a FDA (*Food and Drug Administration*), alto grau de isolamento elétrico, boa resistência ao impacto em baixas temperaturas e de difícil solubilidade, sendo insolúvel em água, hidrocarbonetos, álcoois e cetonas (SANTOS e MARTINS, 2010; THOMAZ, 2012). A formação do PET se dá através de uma reação orgânica de polimerização por condensação entre do ácido tereftálico – TPA ou dimetil tereftalato – DMT com o etilenoglicol – EG (Figura 2).

No Brasil, é permitido o uso do PET reciclado em embalagens, entretanto, fabricantes se queixam pela ausência da homogeneidade na cor do produto (ZAMPAROLLI e JORGE, 2008). Com isso, em 26 de março de 2008, entrou em vigor a RDC nº 20, que dispõe sobre o regulamento técnico de embalagens de poli (tereftalato de etileno) pós-consumo reciclado grau alimentício (PET-PCR grau

alimentício), destinado a entrar em contato com alimentos. Este regulamento objetiva estabelecer os requisitos gerais e os critérios de avaliação, aprovação/autorização e registro de embalagens de PET elaborados com proporções variáveis de PET virgem (grau alimentício) e de PET pós-consumo reciclado descontaminado (grau alimentício), destinados a entrar em contato com alimentos (BRASIL, 2008).

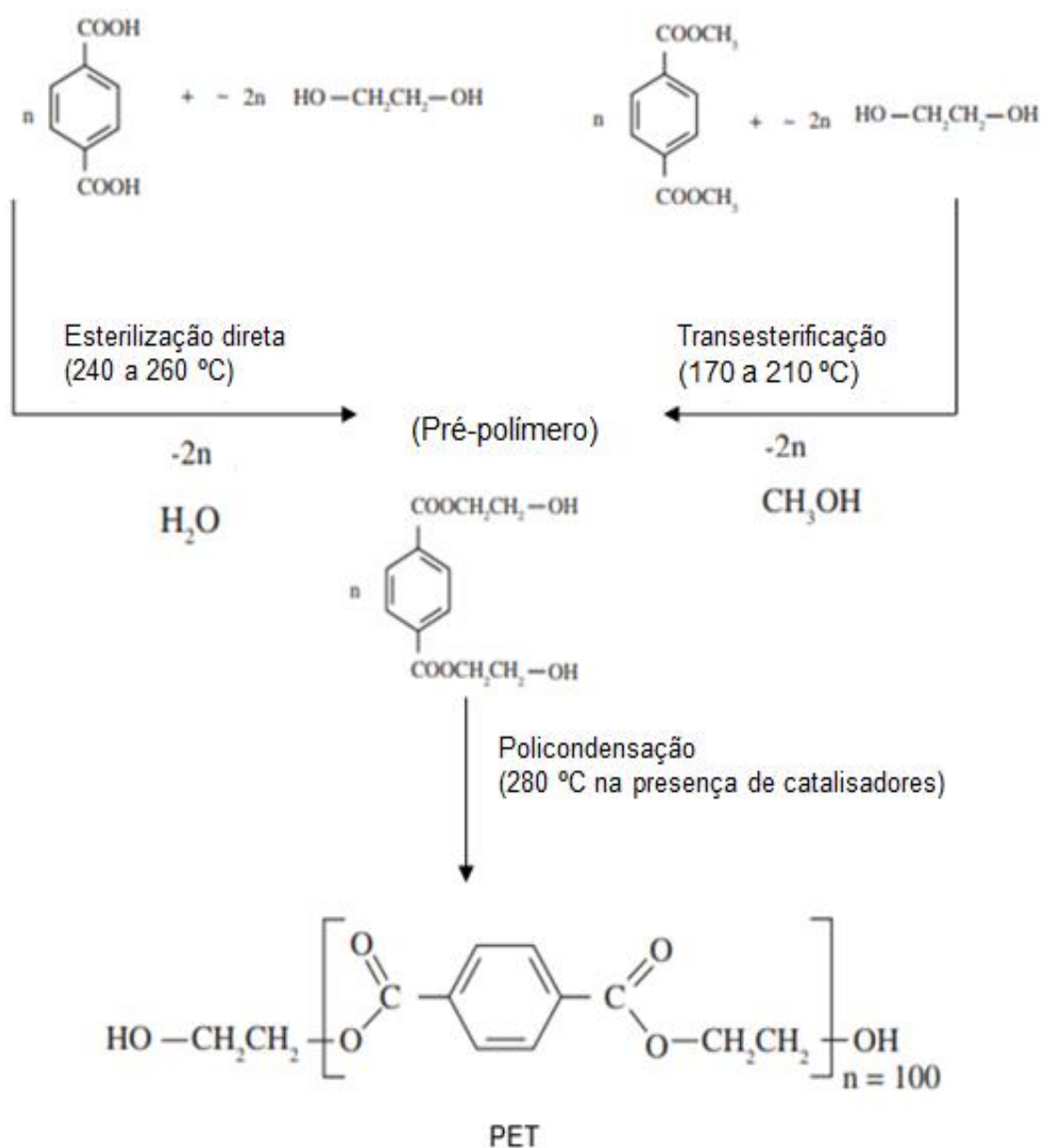


Figura 2 – Sínteses de obtenção do poli (tereftalato de etileno) (PET).

Fonte: Adaptado de Romão, Spinacé e Paoli (2009).

3.3 FUNGOS e o GÊNERO *Pleurotus*

Antigamente, os fungos, organismos heterotróficos, eram apontados como plantas primitivas, ausentes de clorofila. Contudo, ao longo dos anos mostraram uma forma de vida tão singular, que receberam seu próprio reino. Os cogumelos são fungos macroscópicos da classe dos Basidiomicetos, pertencentes ao Reino Fungi (CHANG e WASSER, 2017). Os basidiomas dos fungos do gênero *Pleurotus* são apreciados pelo seu sabor e pelo seu valor nutricional. Apresentam elevado teor de proteínas de alta qualidade, aminoácidos essenciais, elevada proporção de ácidos graxos insaturados, diversas vitaminas e minerais, além de baixos teores de gorduras, colesterol, ácidos nucleicos, baixo teor calórico e baixo custo de produção (BONATTI *et al.*, 2004).

Considerados os principais decompositores da biosfera, os fungos possuem poder de quebra da matéria orgânica, dessa forma liberando dióxido de carbono na atmosfera e substâncias nutritivas ao solo, como por exemplo nitrogênio, favorecendo o reuso dessas moléculas pelas plantas e animais (RAVEN, 2001). Uma característica predominante dos fungos é a presença das hifas (filamentos tubulares) que constituem o micélio (Figura 3), o precursor das funções vegetativas do organismo (TRABULSI, 1999). As hifas são isoladas umas das outras por uma parede transversal porosa chamada de septo, a qual protege as hifas e dá resistência mecânica a todo corpo do micélio, enquanto a parede celular do fungo é composta por quitina, B-glucanos e proteínas, o qual confere características específicas ao organismo (HANEEF *et al.*, 2017).

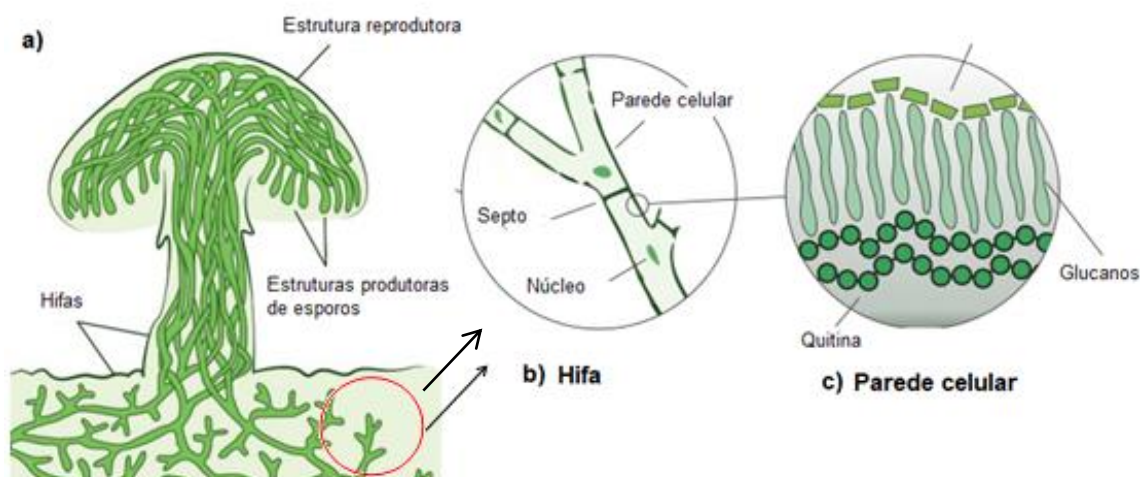


Figura 3 – a) Morfologia dos fungos Basidiomicetos; b) Hifa e c) Parede celular da hifa.

Fonte: Autor - a) Adaptado de Santos (2015); b e c) Adaptado de Vega *et al.* (2012).

Os fungos se reproduzem a partir da produção de milhares de esporos e quando um esporo se instaura em um ambiente, pode germinar e se subdividir para formar um micélio. Quando dois esporos sexualmente compatíveis se encontram, podem cruzar dando origem a um micélio secundário, capaz de originar corpos de frutificação (Figura 4) (OEI, 2006). O micélio é a parte do fungo que mais despertou interesse nos estudos biotecnológicos, pois em meio adequado ele coloniza o substrato, promovendo a decomposição de polímeros naturais em nutrientes que são espontaneamente absorvidos e transportados, como os açúcares (ISLAM *et al.*, 2017).

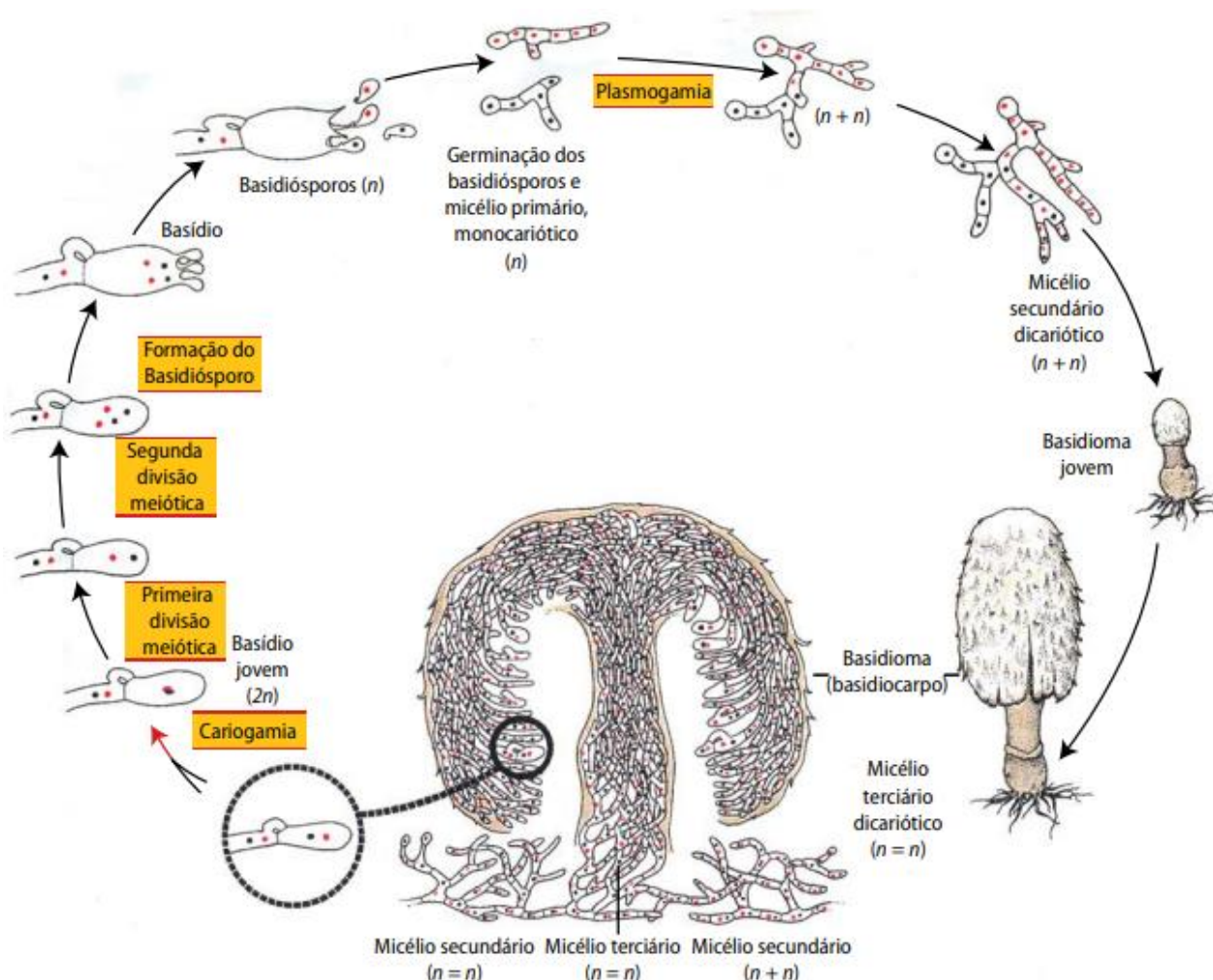


Figura 4 – Ciclo de vida dos fungos Basidiomicetos.

Fonte: Adaptado de Santos (2015).

Os fungos do gênero *Pleurotus* correspondem cerca de 70 espécies (KONG, 2004) e formam um grupo denominado de “fungos de podridão branca”, por produzirem um micélio branco e degradarem tanto a lignina como a celulose. Para

tanto, possuem um complexo enzimático lignocelulósico único com enzimas como celulase, ligninase, celobiase, lacase e hemicelulase que fazem com que estes fungos degradem uma grande variedade de resíduos lignocelulósicos e resíduos orgânicos, inclusive o PET (KOHARI *et al.*, 1997).

As espécies *Pleurotus* compõem 25% da produção mundial e em território nacional, ocuparam a segunda posição de produtividade, aproximadamente 16% do total da produção de cogumelos *in natura* (AMAZONAS, 2013). Fungos dessa linhagem apresentam características interessantes como, simplória adaptação e manutenção, resistência a outros agentes (pragas, por exemplo), curto tempo de crescimento e baixo custo de produção (POPPE, 2000), o que favoreceu sua comercialização, elevando sua popularidade principalmente para aplicação em atividades agrícolas, pois beneficia a ecologia microbiana do solo (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

Para que seja possível a colonização do *Pleurotus*, o micélio pré-cultivado do cogumelo é inoculado em um substrato estéril, livre de qualquer contaminante. Na colonização micelial, o micélio coloniza o substrato a partir dos nutrientes disponíveis. Quando os nutrientes se tornarem escassos, o micélio atinge a fase de reprodução. Após colonizar o substrato, o micélio está apto para produzir corpos de frutificação e a qualidade destes, condiz com fatores como mudança de temperatura, umidade, concentração de dióxido de carbono, luz, entre outros (OEI, 2006). E, para que seja possível o desenvolvimento, manutenção e reprodução deste fungo, é necessário fontes de carbono e nitrogênio (sais de amônio, nitratos e peptonas), por isso, cresce em diferentes resíduos como, por exemplo, serragem, bagaço de cana-de-açúcar e polpa de soja, utilizando o resíduo orgânico anteriormente à sua decomposição natural no solo (CHANG e MILES, 2004; WEBSTER, 1980; ARORA *et al.*, 1992).

É comum que haja a mistura de resíduos lignocelulósicos com outras fontes nutricionais, acarretando a elevação do teor de nitrogênio no substrato. Na literatura, tem-se ênfase para os farelos e ureia (MOLENA, 1989; LI *et al.*, 2001; MODA *et al.*, 2005), assim como, resíduos de fibra de coco com polpa de café (GONZÁLEZ *et al.*, 1993), folhas e bainhas de pupunheira (DUPRAT *et al.*, 2015), bagaço de malte com serragem (GREGORI *et al.*, 2008), bagaço de cana-de-açúcar e palha de arroz (NASCIMENTO *et al.*, 2008), bagaço de malte e folhas de bananeira (SCHULZ, 2016; ROCHA, 2018; DESCHAMPS, 2020). Encontram-se também, misturas com

polipropileno (PP) e poli (tereftalato) de etileno (PET) (DAMBRÓS *et al.*, 2014; FARIA *et al.*, 2015).

3.4 COMPÓSITOS, BIOCAMPÓSITOS E BIOCAMPÓSITOS FÚNGICOS

Compósito é um material sólido decorrente de duas ou mais substâncias singulares a qual cada uma apresenta suas características, que quando ligadas formam um elemento no qual suas propriedades, para determinada aplicação, são superiores às dos componentes individuais. O termo compósito refere-se a um material estrutural (matriz), normalmente composto por polímeros, metais ou ligas, cimentos inorgânicos ou vidro, o qual é incorporado um material fibroso (reforço), podendo ser de composição natural, sintética, metálica, orgânica ou inorgânica, desde que seja de material diferente da matriz (COMPOSITE MATERIAL, 2020; VERMA *et al.*, 2016). A combinação fibra-matriz reduz o potencial de danos externos no material, conservando sua integridade estrutural e protegendo as fibras de danos físicos para obtenção de melhores propriedades térmicas e mecânicas (CALLISTER, 2006).

Atualmente, tem-se um grande interesse em desenvolvimento de tecnologias que ofereçam a aplicação de produtos que impactem menos o meio ambiente. Dessa forma, materiais à base de petróleo levam a discussões relacionadas às questões ambientais, sendo principalmente polipropilenos, polietileno e poliestireno. Pesquisadores buscam meios de modificar esses materiais de forma que os transforme em materiais biodegradáveis e que ao final de vida, sejam depositados no solo, nutrindo-o e trazendo consigo uma alternativa de deposição para esses materiais (MOHANTY, 2000; YANG *et al.*, 2017; JOHANSSON *et al.*, 2012; ZIEGLER *et al.*, 2016).

Assim, com o desenvolvimento de estudos visando à redução de impactos ao meio ambiente associado à viabilidade econômica da utilização de resíduos, surgiram os biocompósitos (MAHAJAN e AHER, 2012). Esses materiais são originados pela junção de fibras naturais e polímeros biodegradáveis ou não-biodegradáveis (SHINOJ *et al.*, 2011). As fibras apresentam pelo menos um de seus componentes de origem natural renovável e é considerado um material substituto de compósitos sintéticos a base de petróleo, recurso não renovável. As fibras também

podem ser provenientes de resíduos de processos agrícolas ou fibras provenientes de fonte animal, vegetal ou mineral (VERMA *et al.*, 2016).

Na produção biocompósitos fúngicos, o micélio fúngico (parte vegetativa) atua como a matriz ligante ao substrato a ser cultivado oferecendo elasticidade e rigidez (LILIVELT *et al.*, 2015). Por ser composto de quitina, o crescimento do micélio se liga às partículas do substrato e ao final do processo de produção, o micélio é inativado por tratamento térmico, com isso, o substrato pode ser de qualquer material rico em celulose, pois os fungos possuem poder de quebra da celulose, hemicelulose e lignina em água e CO₂ (BAYER, 2008 *apud* ZIEGLER *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2017; SILVA e COELHO, 2006). Ou seja, a produção desse material ocorre de maneira espontânea, pelo crescimento biológico, tornando o processo de baixo custo e resultando num resíduo orgânico (JONES *et al.*, 2017).

Os biocompósitos fúngicos são considerados materiais biodegradáveis por sua matriz e partículas ligantes terem origem de recursos renováveis e, ainda, tratar-se de materiais seguros já que dispõe de alta resistência à radiação ultravioleta, resistência química, à oxidação e à temperatura. O tecido fúngico vegetativo inativado antes da formação de basidiocarpos (cogumelos), impossibilita a produção de esporos, possíveis agentes alérgicos (JIANG *et al.*, 2017).

A produção de materiais biocompósitos fúngicos (Figura 5) consiste primeiramente no preparo do substrato com o material a ser inoculado dispersado e misturado a nutrientes que favoreçam o crescimento fúngico. A mistura é inserida em molde esterilizado e sequencialmente, ocorre a incubação de um fungo pré-estabelecido. O fungo metabolizará a mistura e quando observado o desenvolvimento das hifas, de forma com que conecte todo o substrato, formando uma rede micelial, o crescimento é interrompido por tratamento térmico (BAYER, 2008; LILIVELT *et al.*, 2015).

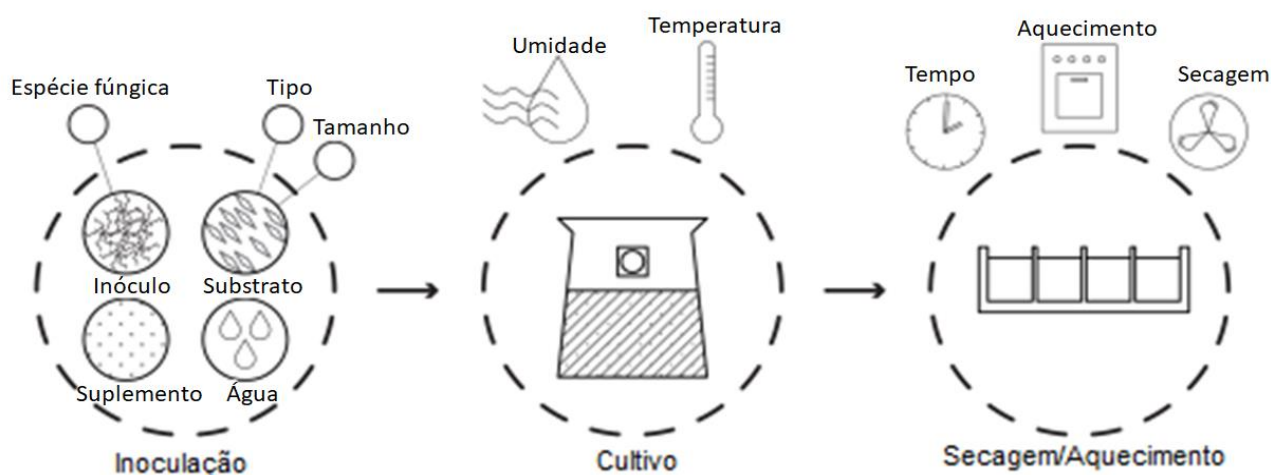


Figura 5 – Diagrama ilustrativo do cultivo micelial para a base de biocompósitos.

Fonte: Ghazvinian *et al.* (2019).

No Quadro 2 seguem exemplos de pesquisas recentes sobre biocompósitos fúngicos.

Quadro 2 – Referências baseadas em biocompósitos fúngicos.

Referências	Descrição
Pedri (2014)	<p>Substrato: Resíduo sólido do processamento de palmito de pupunha (bainha).</p> <p>Fungos: <i>Lentinula edodes</i> (Berk.) Pegler</p> <p>Aplicação: Substituição ao poliestireno expandido.</p>
Referências	Descrição
Ziegler <i>et al.</i> (2016)	<p>Substrato: Subprodutos de algodão e cânhamo, reforçado com tecido natural.</p> <p>Fungos: não citado.</p> <p>Aplicação: Material de embalagem substituto ao poliestireno expandido.</p>
Attias <i>et al.</i> (2017)	<p>Substrato: Serragem de eucalipto, carvalho, pinho, macieira e videira.</p> <p>Fungos: <i>Pleurotus pulmonarius</i>, <i>P. ostreatus</i>, <i>P. salmoneostramineus</i> e <i>Aeegerita agrocibe</i>.</p> <p>Aplicação: Materiais para utilização em arquitetura e <i>design</i> industrial.</p>
Bajwa <i>et al.</i> (2017)	<p>Substrato: Kenaf, cânhamo e milho.</p> <p>Fungos: <i>Daedaleopsis confragosa</i>, <i>Ganoderma resinaceum</i> e <i>Trametes versicolor</i>.</p> <p>Aplicação: Não citada.</p>
Haneef <i>et al.</i> (2017)	<p>Substrato: Celulose e celulose/batata-dextrose.</p> <p>Fungos: <i>Ganoderma lucidum</i> e <i>Pleurotus ostreatus</i></p> <p>Aplicação: Filmes de micélio.</p>

Jiang <i>et al.</i> (2017)	<p>Substrato: Não citado.</p> <p>Fungo: Não citado.</p> <p>Aplicação: Estruturas sanduíche de biocompósitos.</p>
Jones <i>et al.</i> (2017)	<p>Substrato: Casca de arroz.</p> <p>Fungo: <i>Trametes versicolor</i>.</p> <p>Aplicação: Substituição ao poliestireno expandido.</p>
Pelletier <i>et al.</i> (2017)	<p>Substrato: Resíduos de algodão, palha de arroz, talos de sorgo e milho e kenaf.</p> <p>Fungo: Basidiomicetos.</p> <p>Aplicação: Placas acústicas, substituição de MDF e OSB.</p>
Yang <i>et al.</i> (2017)	<p>Substrato: Serragem de bétula do alasca (<i>Betula neoalaskana</i>), grão de milho, farelo de trigo, fibra natural e sulfato de cálcio.</p> <p>Fungo: <i>Irpex lacteus</i>.</p> <p>Aplicação: Material isolante para construção.</p>
Heisel <i>et al.</i> (2017)	<p>Substrato: Resíduos de cana de açúcar e raiz de mandioca, farelo de trigo, fibra natural e sulfato de cálcio.</p> <p>Fungo: <i>Ganoderma Lucidum</i></p> <p>Aplicação: Blocos para construção da MycoTree</p>
Rocha (2018)	<p>Substrato: Resíduos de erva mate e guaraná farelo de trigo, fibra natural e sulfato de cálcio.</p> <p>Fungo: <i>Pleurotus sajor-caju</i>.</p> <p>Aplicação: Embalagens.</p>
Ghosh (2018)	<p>Substrato: Cânhamo, faia e vidro reciclado.</p> <p>Fungo: <i>Ganoderma sp.</i></p> <p>Aplicação: Tijolos de vidro de micélio,</p>
Appels <i>et al.</i> (2019)	<p>Substrato: Serragem de faia, palha de colza e fibras de algodão suplementados com farelo.</p> <p>Fungo: <i>Trametes ochracea</i> e <i>Pleurotus ostreatus</i></p> <p>Aplicação: Não citada.</p>
Attias <i>et al.</i> (2019)	<p>Substrato: Resíduos de poda de culturas de maçã e de videira.</p> <p>Fungo: <i>Colorius sp</i>, <i>Trametes sp</i> e <i>Ganoderma sp</i></p> <p>Aplicação: Não citada.</p>
Agustina <i>et al.</i> (2019)	<p>Substrato: Fibra de açúcar de palma e bagaço de mandioca.</p> <p>Fungo: <i>Ganoderma lucidum</i></p> <p>Aplicação: Não citada.</p>
Elsacker <i>et al.</i> (2019)	<p>Substrato: Cânhamo, linho, pó de palha de trigo e palha de trigo.</p> <p>Fungo: <i>Trametes versicolor</i></p> <p>Aplicação: Não citada.</p>

Ghazvinian <i>et al.</i> (2019)	Substrato: Serragem e palha. Fungo: <i>Pleurotus ostreatus</i> , Aplicação: Arquitetura.
Bruscato <i>et al.</i> (2019)	Substrato: Serragem e farelo de trigo. Fungo: <i>Pycnoporus sanguineus</i> , <i>Pleurotus albidus</i> e <i>Lentinus velutinus</i> . Aplicação: Espumas.
Liu <i>et al.</i> (2019)	Substrato: Talo de algodão. Fungo: <i>Ganoderma lucidum</i> . Aplicação: Espumas.
Ridzqo <i>et al.</i> (2020)	Substrato: Fibras de bambu. Fungo: <i>Ganoderma lucidum</i> . Aplicação: Quadros de isolamento.
Deschamps (2020)	Substrato: Bagaço de malte e folhas de bananeira. Fungo: <i>Pleurotus sajor-caju</i> Aplicação: Produção de embalagens ativas e inteligentes.

Além das pesquisas citadas na literatura (Quadro 2), encontram-se produtos já sendo comercializados. A marca Adidas criou um tênis numa versão de couro de micélio fúngico com base em um dos seus modelos clássicos, Stan Smith. O couro da parte superior do produto, denominado *Mylo* (couro vegano), foi produzido em laboratório e foi originalmente criado pela empresa de biotecnologia americana *Bolt Threads* em 2018. Atualmente, o material foi refinado em conjunto com a Adidas para adequar o processo na produção em calçados de alto desempenho (Figura 6a). A marca de luxo *Hèrmes* em parceria com a empresa de biomateriais *MycoWorks*, produziram um dos modelos de bolsa da marca com alternativa de couro cultivado a partir de micélio fúngico. Em esperada tendência outono-inverno 2021/2022, a bolsa estará disponível no final do ano de 2022 e possui design muito similar a original, desde sua aparência até seu gradiente de cores (Figura 6b).



Figura 6 – Produtos feitos de micélio fúngico. a) Adidas Stan Smith *Mylo*; b) Bolsa de couro de cogumelo da marca Hermès;

Fonte: Deeze (2021).

Em 2020, empresas de moda como a Adidas, McCartney e Kering, controladora da Gucci, entraram em acordo, cada marca investindo cerca de sete dígitos para aumentar a produção em massa de *Mylo*. A estilista Stella McCartney em colaboração com a *startup* americana *Bolt Threads*, transformou um biomaterial em acessório utilizável criando duas peças de roupa feitas de *Mylo*. As peças foram confeccionadas à mão a partir de painéis de material à base de micélio e colocados sobre *nylon* reciclado, resultando em um *bralette* longo e um par de calças estilo balão (Figura 7).



Figura 7 – Roupas de *Mylo* criadas por McCartney.

Fonte: Deezen (2021).

A empresa americana Ecovative desenvolve variados materiais a base de micélio fúngico, entre eles estão espuma de micélio de alto desempenho, produtos alimentares que satisfaçam ou superem o sabor, a textura e formas da carne animal, desenvolvimento de couro vegano e produtos plásticos biodegradáveis (Ecovative, 2021).

Carlo Ratti, arquiteto italiano, criou uma estrutura arquitetônica em arco com cogumelos inspirada em obras do arquiteto catalão Antoni Gaudí e apresentado na semana de *design* de Milão. Ao final da exposição, o arco foi depositado ao solo para degradação natural. Foram 60 arcos de 4 metros de altura, representando de ponta a ponta 1km de comprimento, tornando-se recorde de aplicação do material fúngico (Figura 8a). O *Growing Pavilion* foi um espaço de eventos temporário para a *Dutch Design Week*, construído com painéis de madeira e micélio de cogumelo. Foi projetado pelo cenógrafo e artista Pascal Leboucq com colaboração do estúdio *Biobased Creations* de Amsterdã. A estrutura foi fixada a painéis de madeira e removidos e reaproveitados conforme necessidade (Figura 8b).



Figura 8 – a) Jardim Circular, estrutura arquitetônica feita de cogumelos por Carlo Ratti Associati; b) *Growing Pavilion*, espaço de evento temporário.

Fonte: Deeze (2021).

Na Argentina foi criado um recente projeto de pesquisa e desenvolvimento biotecnológico pela Superpraxis que se trata da construção de uma instalação efêmera na cidade de San Carlos de Bariloche, produzida por resíduos orgânicos e micélio (Figura 9).



Figura 9 – Refúgio fúngico da oficina Superpraxis.

Fonte: ArchDaily (2021).

O projeto propôs a geração de um refúgio montado pela repetição de tijolos de micélio de *Ganoderma Lucidum* formando uma parede que possibilita as trocas gasosas entre o meio interno e externo, buscando a familiaridade da aplicação do material no meio arquitetônico.

3.5 PROCESSO DE SECAGEM CONVENCIONAL

A secagem é uma das técnicas mais antigas e aplicadas em processos na indústria agrícola, cerâmica, química, alimentícia, farmacêutica, de papel e celulose, mineral e de polímeros (MENON e MUJUMDAR, 1987). O processo de secagem convencional é um método que utiliza calor em condições de temperatura, umidade e corrente de ar controlados, que objetiva a remoção de água presente em um determinado material à pressão atmosférica em estufa convencional. Sua operação se dá através de transferência de calor por convecção, trocando calor entre um fluido e um sólido, então, o ar aquecido transfere calor para a superfície sólida a ser seca. Dessa forma, a elevação da temperatura entre a superfície aquecida e o centro desta, provoca a troca de calor entre as regiões, por condução térmica (DIAS, 2013).

3.6 PROCESSO DE SECAGEM À VÁCUO

As estufas de secagem à vácuo possuem cilindros de pressão, desenvolvidos de aço e isolados com fibra de vidro envolta em lâminas de alumínio. O processo de secagem a vácuo é definido pela diminuição da temperatura de ebulição da água quando sujeito a um ambiente com pressões menores à pressão atmosférica. A baixa temperatura necessária conduz a um grande gradiente térmico entre a camisa e a amostra sendo então aumentada a transferência de calor e capacidade de secagem. Além do mais, torna-se um processo indicado para materiais sensíveis à temperatura (MASPELL, 1980; SMITH *et. al*, 1994). Entretanto, o processo pode apresentar adversidades relacionadas a transferências de calor, pois o método possibilita que a velocidade de secagem seja tão rápida quanto a secagem a elevadas temperaturas sob pressão atmosférica (SIMPSON, 1984).

4. METODOLOGIA

4.1 MICRORGANISMO E MANUTENÇÃO

A linhagem de fungos utilizada foi de *Pleurotus sajor-caju* (Figura 10) e suas matrizes foram obtidas do Instituto de Botânica, no município de São Paulo/SP, Coleção de Culturas de Basidiomicetos, que se refere a uma linhagem de espécie denominada CCB 019. O armazenamento do microrganismo foi feito em placas de Petri em meio TDA (Trigo Dextrose Ágar) constituído por 20 g/L de dextrose e 15 g/L de ágar em extrato de trigo. Por sua vez, o extrato de trigo foi obtido pelo cozimento de grãos de trigo em água destilada na proporção 1:2 durante 10 minutos (grãos de trigo: água, m/v). (FURLAN *et al.*, 1997). Após o processo de autoclavagem (QUIMIS 9298-26) a 121 °C e 1 atm por 60 minutos, em câmara de fluxo laminar (PACHANE PA420) adicionou-se o meio ainda quente às placas de Petri. Em sequência, o resfriamento se procedeu sob luz ultravioleta (UV) ao longo de 30 minutos e as placas foram vedadas com Parafilm M® e incubadas a 30 ± 2 °C durante 7 dias para descartes em caso de contaminações. Cada placa foi inoculada com um disco de ágar ($\varnothing = 12 \pm 1$ mm) contendo a espécie fúngica proveniente de uma cultura prévia. As placas foram incubadas na ausência de luz, em uma estufa bacteriológica (TECNAL TE-392/1 MP), a 28 ± 2 °C até a completa colonização da placa pelo micélio fúngico (cerca de 7 dias). Por fim, as placas foram armazenadas em refrigeradores a 4 °C com repiques realizados a cada 3 meses.

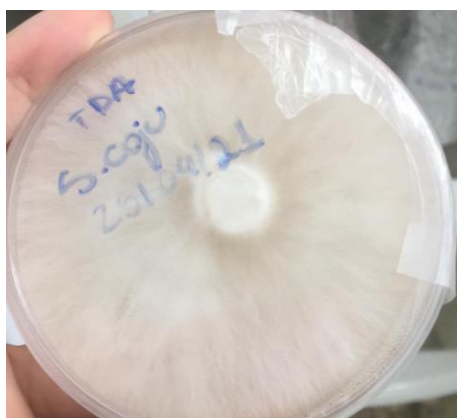


Figura 10 – Matriz de *Pleurotus sajor-caju*.

4.2 PREPARO DO INÓCULO

O inóculo consistiu em grãos de trigo colonizados com micélio de *Pleurotus sajor-caju* preparado conforme metodologia descrita por Bonatti *et al.* (2004). Os grãos de trigo foram lavados em água corrente e cozidos por 10 minutos (após início da fervura) em água destilada na proporção 1:2 (grãos de trigo: água, m/v). O extrato proveniente do cozimento foi drenado e utilizado na produção do meio TDA (item **Error! Reference source not found.**) e os grãos foram suplementados com carbonato de cálcio (CaCO_3) e sulfato de cálcio (CaSO_4) nas proporções de 0,35% e 1,3%, respectivamente, em relação a massa de grãos de trigo secos. A adição destes componentes tem a finalidade de manter o pH ligeiramente alcalino e deixar os grãos descompactados. Em seguida, os grãos foram embalados (250 g de grãos de trigo por pacote de polipropileno 20 x 30 cm), fechados com um respiro de espuma para facilitar a troca gasosa e, então, foram esterilizados em autoclave (QUIMIS 9298-26) a 121 °C e 1 atm por 1 hora. Após a esterilização e resfriamento e em câmara de fluxo laminar (PACHANE PA420), cada pacote foi inoculado com 3 discos do meio TDA ($\text{Ø} = 12 \pm 1$ mm) contendo o micélio fúngico de *P. sajor-caju* CCB 019 das placas de manutenção (Figura 11). Após a inoculação, os pacotes foram incubados em estufa bacteriológica (TECNAL TE-392/1 MP), a 28 ± 2 °C em ausência de luz até a completa colonização da superfície do grão pelo micélio fúngico (cerca de 20 dias). Então, estes foram armazenados sob refrigeração a 4 °C por um período máximo de 3 meses.

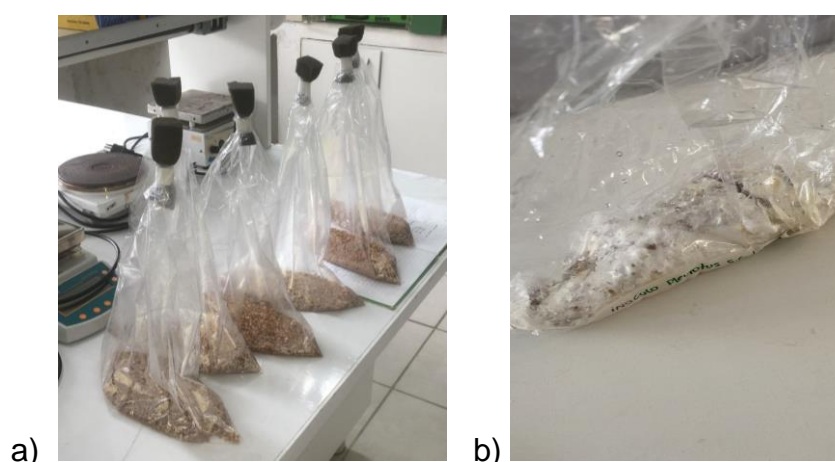


Figura 11 – Grãos de trigo inoculados com micélio de *Pleurotus sajor-caju*: a) Antes da incubação; b) Após a incubação.

4.3 PRODUÇÃO E ANÁLISES DOS BIOCOMPÓSITOS

Embalagens alimentícias, oriundas do processo de termoformagem, compostas por papel cartão do tipo SBS (*solid bleached sulfite*) com revestimento de PET (poli (tereftalato de etileno)), rejeitadas no controle de qualidade, foram fornecidas pela empresa Baumgarten Gráfica Ltda., do município de Blumenau – SC para serem utilizadas nesse trabalho. Na Figura 12 pode-se observar o fluxograma mostrando as condições experimentais e as análises realizadas nos biocompósitos.

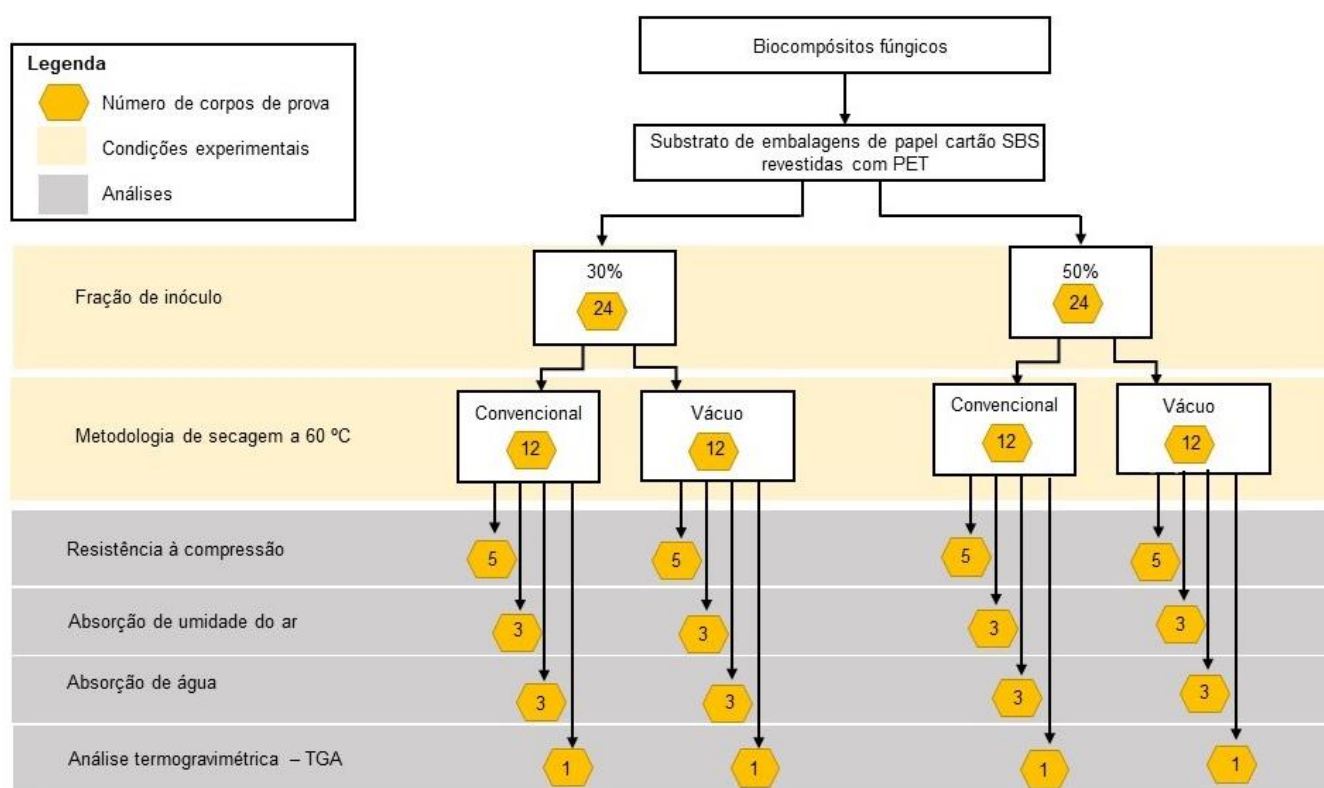


Figura 12 – Fluxograma das condições experimentais e análises realizados nos biocompósitos fúngicos.

4.3.1 Substrato de papel cartão SBS revestido com PET

O substrato de papel cartão SBS revestido com PET foi fragmentado (2x10 mm) em picotadora (SECRETA 9520) (Figura 13), embalado em gaze e imerso em água em copos de Béquer por 24 horas e retirado o excesso após o período. A mistura foi suplementada com 5% de farelo de arroz em relação à massa de

substrato seco (WESTPHAL, 2017). O substrato não foi submetido à produção de basidiocarpos.

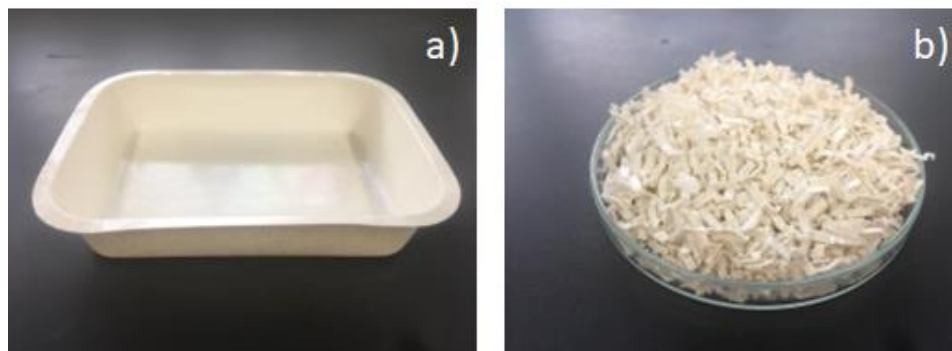


Figura 13 – Substrato de embalagem de papel cartão SBS revestida de PET: a) Antes do picote; b) Após o picote.

4.3.2 Preparo dos corpos de prova dos biocompósitos

O substrato de papel cartão SBS revestido com PET foi acondicionado em pacotes de polipropileno (28x40 cm), fechados com respiros de espuma, fixados com fita crepe e esterilizados em autoclave (QUIMIS 9298-26) a 121 °C e 1 atm por 1 hora (Figura 14).

A inoculação foi feita em câmara de fluxo laminar usando-se 30% ou 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* em relação à massa de substrato seco. Foram preparados 6 pacotes para cada fração de inóculo, ou seja, 12 pacotes. Posteriormente, os pacotes foram incubados na ausência de luz, em estufa bacteriológica (TECNAL TE-392/1 MP) com circulação forçada de ar a 30 ± 2 °C, até a completa colonização do substrato pelo micélio fúngico, em torno de 20 dias.



Figura 14 – Pacotes com o substrato colonizado pelo micélio fúngico.

Para produção dos corpos de prova dos biocompósitos, os substratos colonizados de cada fração de inóculo (30 e 50%) de *Pleurotus sajor-caju* foram triturados em miniprocessador de alimentos (Philco 800 W) até a obtenção de mistura homogênea. Os substratos processados foram introduzidos e compactados, assepticamente, em moldeiras plásticas cilíndricas (6 cm Ø) até 2,5 cm de altura, para se obter corpos de prova de acordo com a NBR 8082 (ABNT, 2016). Todo o processo foi realizado em câmara de fluxo laminar e tanto o multiprocessador quanto as moldeiras passaram por tratamento asséptico com álcool 70% e sob luz UV durante 15 minutos. Foram preparados 12 corpos de prova para cada fração de inóculo, totalizando 48 amostras. As moldeiras foram fechadas e as tampas lacradas com *Parafilm M*® e incubadas em estufa bacteriológica (TECNAL TE-392/1MP) na ausência de luz, a 30 ± 2 °C, até recolonização e restabelecimento das hifas do micélio fúngico. Este tempo foi contabilizado para cada fração de inóculo utilizada.

4.3.3 Secagem dos corpos de prova dos biocompósitos

Após a colonização total do substrato, os biocompósitos fúngicos foram submetidos à secagem em estufa convencional (SHEL LAB 1370 FX) ou em estufa a vácuo (LGI-VO-6030B), ambas na temperatura de 60 °C. A estufa convencional operou a 1 atm, condições atmosféricas normal e a estufa à vácuo operou a 0,04 MPa (300 mmHg). Suas respectivas massas foram inicialmente anotadas (M_i) e medições foram realizadas a cada 24 horas até a obtenção de massa final constante (M_f). Com esses dados, pode-se construir curvas de secagem (massa x tempo) e obter-se a velocidade média de secagem (g/dia), de cada condição (fração de inóculo e condição de secagem), através da Equação (1), onde t_f foi o tempo final da secagem. O teor de umidade inicial (U_i %) foi descoberto a partir da Equação (2).

$$v \text{ (g/dia)} = \frac{M_i - M_f}{t_f} \quad (1)$$

$$U_i(\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad (2)$$

Já, o teor de umidade final ($U_f\%$) foi definido como a umidade dos corpos de prova, ou seja, após a secagem a 60 °C. Para tanto, cinco corpos de prova continuaram sendo secos a 105 °C ($M_{105\text{ °C}}$) até a obtenção de massa constante sem umidade, seguindo a Equação (3).

$$U_f(\%) = \frac{M_f - M_{105\text{ °C}}}{M_f} * 100 \quad (3)$$

Os corpos de prova foram desenhados e armazenados em dessecador até sua posterior utilização nas análises (item 4.3.4). Na Figura 15 é possível analisar o antes e depois da recolonização e restabelecimento das hifas do micélio fúngico dentro das moldeiras.

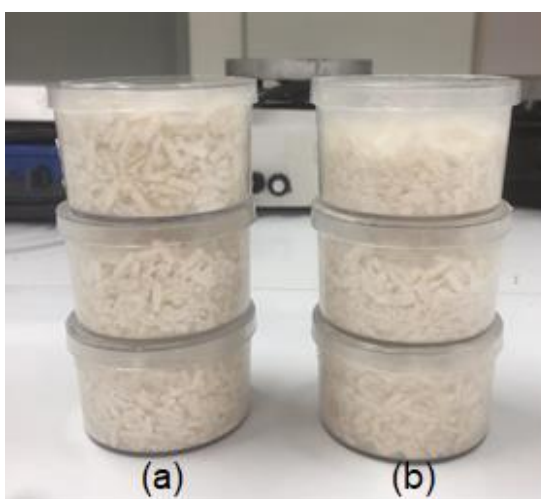


Figura 15 – Moldeiras com o substrato processado antes (a) e depois (b) da recolonização e restabelecimento das hifas.

4.3.4 ANÁLISES DOS BIOCOMPÓSITOS

Nos corpos de prova o tempo de crescimento micelial foi definido baseado nos dias desde a inoculação até a colonização completa do substrato pelo micélio fúngico. Foram avaliados nas duas frações de inóculo (30 e 50%) teor de umidade, velocidade média de secagem (para ambas as metodologias – em estufa convencional e à vácuo), absorção de água e absorção de umidade do ar, análise

termogravimétrica para definição de melhor condição de processo (fração de inóculo e metodologia de secagem).

4.3.4.1 Influência da imersão em água

A análise de absorção de água foi baseada no método de imersão repetida D-570 (ASTM, 1998).

Foram utilizados três corpos de prova de cada condição de produção, obtendo-se sua massa inicial (M_i) em balança analítica (SHIMADZU AY220) e posterior imersão em água destilada, com pH 7 ± 1 e temperatura de 25 ± 1 °C, cobertos por 25 ± 5 mm de água por 2, 24 e 48 horas, para o monitoramento do poder de sorção de água. Se de 24 a 48 h o percentual de sorção não for alterado significa que em 24 horas o material alcançou a saturação em água. Em cada um dos tempos os corpos de prova, quando retirados da água, foram suavemente enxugados com papel absorvente para remoção do excesso de água. O percentual de absorção de água foi definido pela Equação 4 a partir da massa obtida (M_t).

$$A(\%) = \frac{M_t - M_i}{M_i} \times 100 \quad (4)$$

Onde M_t é a massa (g) do corpo de prova após os tempos de imersão em água destilada e M_i é a massa inicial.

4.3.4.2 Influência da umidade do ar

A fim de verificar a influência da absorção de umidade do ar, foram analisados três corpos de prova de cada condição, estes expostos ao ambiente com a umidade relativa do ar e a temperatura local monitorada durante 60 dias, simulando a exposição deste material ao ambiente de trabalho. Para monitoramento, os corpos de prova foram pesados (a cada dois dias) e a taxa de sorção de umidade foi determinada a partir da Equação 5.

$$Uar(\%) = \frac{M_t - M_i}{M_i} \times 100 \quad (5)$$

Onde M_i é a massa (g) inicial do corpo de prova e M_t é a massa (g) mensurada a cada período de amostragem.

4.3.4.3 Resistência à compressão

Com o intuito de avaliar a influência da fração de inóculo e da temperatura de secagem quanto a resistência à compressão, cinco corpos de prova, produzidos de acordo com o item 4.3, foram submetidos ao teste de compressão, realizado no laboratório de materiais do Centro de Aplicação Mecânica e Gestão Industrial (CAMEGI), integrado à Univille, de acordo com a NBR 8082 (ABNT, 2016). O teste foi realizado em máquina universal de ensaios mecânicos (EMIC DL 10000/700) com célula de carga de 500 N e a velocidade de travessa de 2 mm/min. Antes do início do ensaio, os corpos de prova foram medidos, espessura e diâmetro, com paquímetro para a obtenção de uma espessura inicial média e diâmetro médio (obtenção da área da seção transversal). A densidade (d) de cada corpo de prova foi calculada conforme a Equação 6 utilizando as medidas obtidas antes da compressão para o cálculo do volume (V) e a massa (m) logo após a secagem.

$$d = \frac{m}{V} \quad (6)$$

A tensão de compressão (σ_c) foi calculada em 10% de deformação dos corpos de prova, sendo a deformação máxima, conforme orienta a NBR 8082. A Equação 7 foi utilizada para cálculo da tensão de compressão, dada pela razão entre força de compressão (F) e a área da seção transversal do corpo de prova (A_0).

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (7)$$

4.3.4.4 Análise termogravimétrica (TGA)

A estabilidade térmica dos biocompósitos fúngicos produzidos em substrato de papel cartão SBS revestido com PET foi explorada pela análise termogravimétrica. O papel cartão SBS revestido com PET sem o crescimento fúngico foi utilizado como referência (controle). A análise foi executada em equipamento TGA-Q50 (*TA Instruments*). A razão de aquecimento foi de 10 °C/min, partindo de 25 a 600 °C em atmosfera de nitrogênio (vazão de 60 mL/min). Esta análise foi realizada no Laboratório de Materiais da Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE e os parâmetros experimentais foram ajustados no *software TA Universal Analysis* e representados graficamente para interpretação.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram analisados pelo teste estatístico para rejeição de valores desviantes (Teste Q de Dixon), sendo aceitos ou não (RORABACHER, 1991). Foram também submetidos à análise de variância dos valores médios das amostras, através do Teste Tukey com nível de significância de 5% (ANOVA).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tempos de crescimento micelial e o tempo total de processo referente a produção dos corpos de prova dos biocompósitos estão apresentados na Figura 16. O tempo de crescimento micelial, refere-se ao tempo para a completa colonização do substrato nos pacotes. Dessa forma, os pacotes produzidos com papel cartão revestido com PET, com fração de 30 e 50% de inóculo, apresentaram tempo de crescimento micelial de 14 e 7 dias respectivamente.

Após o substrato colonizado pelo micélio fúngico passar pelo processo de trituração e distribuição nas moldeiras para o reestabelecimento das hifas, o tempo para a completa recolonização do substrato nas moldeiras foi de 5 e 7 dias para os percentuais de 30 e 50%, respectivamente, resultando num tempo de crescimento micelial total de 19 e 14 dias.

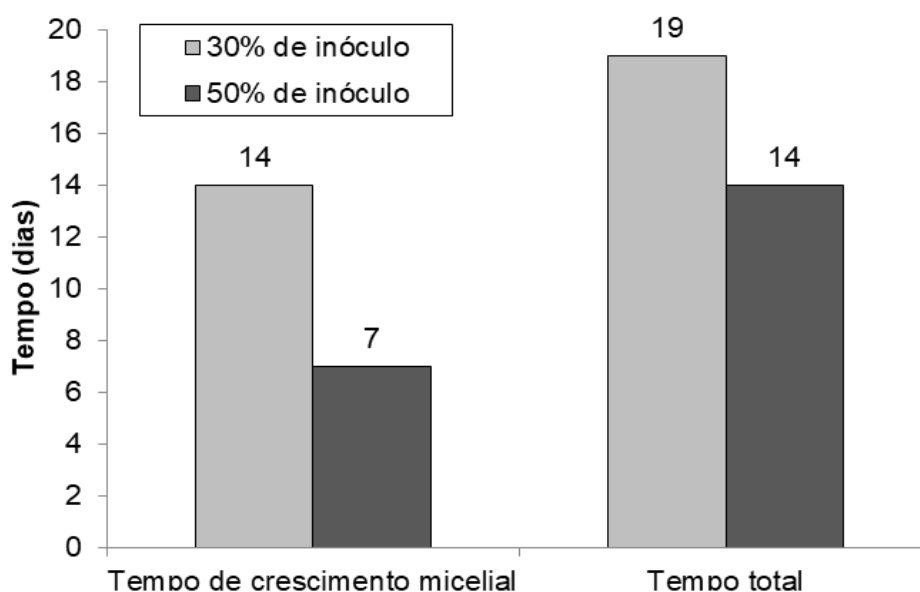


Figura 16 – Tempo de crescimento micelial e tempo total do processo de produção dos corpos de prova do material biocompósito no substrato com 30 e 50% de inóculo.

Em relação ao tempo de crescimento micelial, a condição de 50% se mostrou mais favorável em relação à condição de 30% de fração de inóculo evidenciando que quanto maior o teor de inóculo inicial, menor será o tempo necessário para o crescimento micelial.

Rocha (2018) produziram biocompósitos com erva-mate e guaraná (1:1) *in natura* inoculados com 30% de *Pleurotus sajor-caju*, obtendo-se tempo total do processo de produção de 11 dias. Deschamps (2020), que produziu biocompósitos com substrato de bagaço de malte e folhas de bananeira utilizando 30% de inóculo, também obteve tempo global de processo de 16 dias. Bruscato (2019), produziu bioespumas BS3 a partir de resíduos agroindustriais com *Pycnoporus sanguineus*, *Trametes villosa*, *Lentinus velutinus*, *Pleurotus djamor*, *Pleurotus albidus* e *Xylaria* sp. Os cultivos foram mantidos em incubação durante 15 dias, apresentando maior desenvolvimento entre o período do dia 9 e 12. No nono dia, entre todas as linhagens estudadas, a *T. villosa* foi a que apresentou crescimento total, entretanto, para as demais linhagens, o mesmo perfil foi obtido no décimo segundo dia de cultivo. Entretanto, Appels *et al.* (2019) produziu biocompósitos de serragem de faia, palha de colza e fibras de algodão com *Trametes Ochracea* e *Pleurotus ostreatus*, alcançando 24 dias de tempo total do processo de produção para todos os substratos aplicados. Já, Attias *et al.* (2019), utilizaram resíduos de poda de culturas de maçã e de videira com três espécies fúngicas, *Colorius* sp, *Trametes* sp e *Ganoderma* sp, para a produção de biocompósitos verificaram tempo total de 14 dias em média, para as espécies testadas, com mais 2 dias para o processo de secagem resultando em um tempo global de processo de 16 dias. Valor igual ao obtido neste estudo (Figura 16). Agustina *et al.* (2019) produziram biocompósitos com fibra de palma e bagaço de mandioca com *Ganoderma lucidum*, e o tempo total foi de 12 dias, com um tempo global de processo de 13 dias e secagem entre 55 e 60 °C.

Verifica-se que, os tempos totais do processo de produção avaliados na literatura ficaram entre 9 e 24 dias. Os tempos resultantes neste estudo estão de acordo tanto para 30% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* como para 50%. Lembrando que tanto o substrato quanto a espécie fúngica e a fração utilizada, influenciam no tempo de crescimento micelial (CHANG e MILES, 2004), justificando as diferenças encontradas na literatura.

Para cessar o crescimento fúngico, os corpos de prova foram submetidos a duas condições de desidratação, a secagem em estufa convencional e a vácuo, na temperatura de 60 °C. Na Figura 17 pode ser observado o comportamento das curvas de secagem dos biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo, assim como também, o desempenho das duas metodologias testadas.

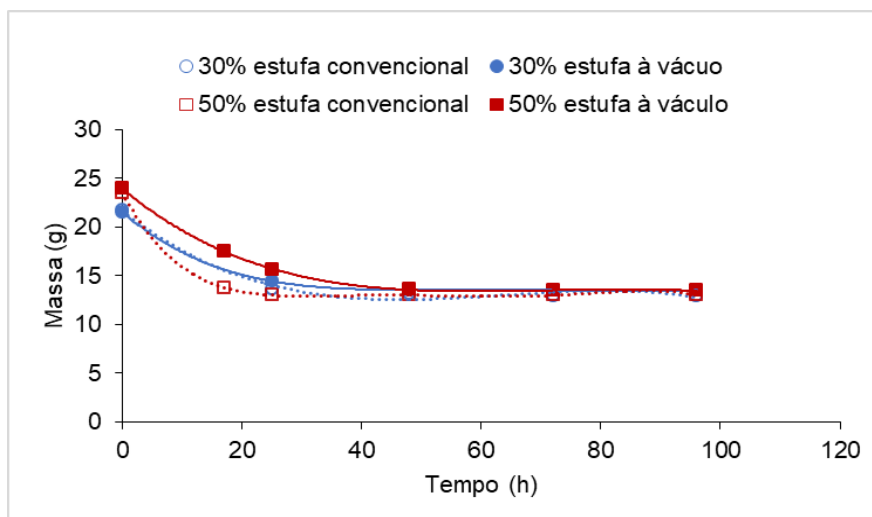


Figura 17 – Curvas de secagem, massa (g) x tempo (horas), dos biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo a secagem em estufa convencional e à vácuo.

A partir das curvas de secagem (Figura 17), é possível notar que, para a fração de 30% de inóculo não houve diferença na velocidade de secagem entre as duas metodologias utilizadas. Entretanto, para a fração de 50% as curvas apresentaram diferenciação nas primeiras 24 horas de secagem, sendo a estufa convencional mais rápida que a estufa à vácuo. Porém, ambas as frações tiveram um tempo total de secagem de 48 horas independentemente do tipo de secagem utilizada e após este período de secagem não se observou mais variações nas massas dos corpos de prova para todas as condições, sendo este o tempo estabelecido como tempo final de secagem para todas as condições testadas.

Rocha (2018), cessou, após 48 h, o crescimento fúngico de corpos de prova de fração de inóculo de 20 e 30% de *Pleurotus sajor-caju* nas temperaturas de secagem de 40 e 60 °C, observando que a fração de inóculo não influenciou na velocidade inicial de secagem e que antes da secagem, todas as condições apresentaram teor de umidade em torno de 67%. A autora obteve uma maior velocidade inicial de secagem a 60 °C. Assim como Rocha (2018), Deschamps (2020) utilizou as mesmas frações de inóculo e temperaturas de secagem, obtendo maior velocidade de secagem a 60 °C e levando 48 h para secagem dos corpos de prova.

Os valores de teor de umidade inicial (antes do início da secagem), do teor de umidade final (após a secagem), da velocidade de secagem, do tempo de secagem

e do tempo global de processo que é o tempo total de processo (Figura 16) mais o tempo de secagem, dos corpos de prova são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios de teor de umidade inicial \pm dp (%) e final, velocidade média de secagem \pm dp (g/dia), tempo de secagem (dias) e tempo global de processo (dias) dos corpos de prova produzidos com 30 e 50% de inóculo e secos à 60 °C em estufa convencional e a vácuo. Letras iguais nas colunas significam médias sem diferença significativa pelo teste de Tukey com nível de confiança de 95%.

Fração de inóculo (%)	Teor de umidade inicial (%)	Condição de secagem a 60 °C	Teor de umidade final (%)	Velocidade média de secagem (g/dia)	Tempo de secagem (dias)	Tempo global de processo* (dias)
30	40,1 \pm 7,2 <i>a</i>	Convencional	5,22 \pm 0,75 <i>c</i>	4,53 \pm 0,99 <i>d</i>	2	21
30		Vácuo	5,85 \pm 1,31 <i>c</i>	4,46 \pm 1,23 <i>d</i>	2	21
50	44,7 \pm 2,8 <i>b</i>	Convencional	5,47 \pm 0,61 <i>c</i>	5,58 \pm 0,49 <i>e</i>	2	16
50		Vácuo	5,59 \pm 1,10 <i>c</i>	5,18 \pm 0,47 <i>f</i>	2	16

Observa-se, na Tabela 1, que a fração de inóculo influenciou o valor de umidade inicial, sendo maior com a fração de inóculo de 50% (44,7%). No entanto, como esta diferença é apenas em torno de 4%, não foi observado diferença estatística no tempo de secagem, levando 2 dias para alcançar a estabilidade, (Figura 17 e Tabela 1) em qualquer das condições testadas, assim como, o teor de umidade final.

Entretanto, para a fração de 50%, a velocidade média de secagem sofreu influência do método de secagem, sendo maior com a secagem convencional. Isto não foi observado para fração de 30% que tanto a estufa convencional quanto à vácuo apresentaram a mesma velocidade de secagem. Sabe-se que a secagem à vácuo possibilita uma velocidade de secagem tão rápida quanto a secagem a elevadas temperaturas sob pressão atmosférica (SIMPSON, 1984), no entanto isto não foi observado para este material na temperatura de 60 °C.

Contudo, analisando-se os tempos de produção dos corpos de prova (Figura 16) e os tempos de secagem (Tabela 1), nota-se que a condição de 50% de inóculo apresentou menor tempo global do processo de produção (16 dias). Chamando a atenção para a condição de secagem em estufa convencional, onde a velocidade média de secagem foi a maior (5,58 g/dia).

Na Figura 18 estão apresentados os corpos de prova com 30 e 50% de inóculo e secos em estufa convencional e a vácuo. Percebe-se que os corpos de prova demonstram similaridade, não havendo diferença visual após as secagens.

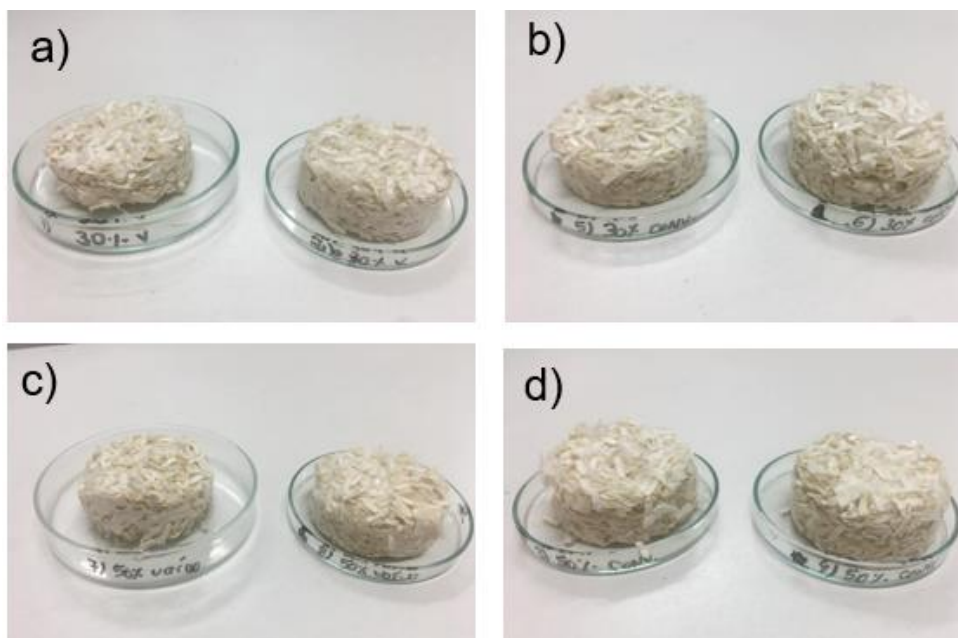


Figura 18 – Corpos de prova (% de inóculo e metodologia de secagem): a) 30% em estufa à vácuo; b) 30% em estufa convencional; c) 50% em estufa à vácuo; d) 30% em estufa convencional.

Pedri (2014) produziu biocompósitos a partir de fibras de pupunheira com *Lentinula edodes* e a umidade inicial obtida foi de 59,7%. Rocha (2018), obteve umidade inicial de 66,47% em biocompósitos feitos de erva-mate e guaraná com 30% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* e secos a 60 °C. Deschamps (2020), obteve teor de umidade inicial mais elevado para os biocompósitos a partir de bagaço de malte e folhas de bananeira produzidos com 30% de inóculo chegando a 78,4%. Observa-se que no presente trabalho o teor de umidade inicial ficou bem abaixo do que estes reportados na literatura. Isto pode estar relacionado ao fato de o substrato ser papel cartão revestido com PET e a presença do PET pode ter causado uma parcial impermeabilização.

Em termos de teor de umidade final, ou seja, a umidade do produto final, Deschamps (2020), obteve 5,67% a 6,38% de umidade para os biocompósitos a partir de bagaço de malte e folhas de bananeira produzidos com 20 e 30% de inóculo e secos a 60 °C. Agustina *et al.* (2019), produziram biocompósitos feitos de fibra de açúcar de palma e bagaço de mandioca, secos a 55 a 60 °C durante 20

horas e obtiveram uma umidade final entre 7,9 a 8,8%. Os valores da literatura encontrados foram superiores aos obtidos no presente estudo, percebendo-se que a umidade final está atrelada ao substrato utilizado para cultivo, assim como também, o tempo de secagem dos corpos de prova.

Conforme Deacon (2006) a umidade a qual nenhum fungo consegue crescer é abaixo de 14%, no entanto, um pequeno aumento na umidade para 15 a 16% permitirá o crescimento do *Aspergillus spp.*, fungo tolerante ao estresse. A umidade apresentada no presente trabalho para o produto final está abaixo de 14% (5,22 a 5,85%), valor necessário para inibição do crescimento de fungos, tornando o produto viável e funcional.

O tipo de substrato utilizado também influenciou na velocidade média de secagem. Rocha (2018) e Deschamps (2020) mediram a velocidade média de secagem a 60 °C em estufa convencional dos biocompósitos produzidos com 30% de inóculo de *P. sajor-caju* e chegaram a 26,1 e 17,5 g/dia quando os biocompósitos foram feitos de erva mate e guaraná e de bagaço de malte e folhas de bananeira, respectivamente. Percebe-se que estas velocidades são mais elevadas que a obtida neste trabalho com condições similares, ou seja, 5,58 g/dia (Tabela 1).

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos de sorção de água dos corpos de prova dos biocompósitos. Nota-se que a sorção de água em 48h se repetiu após 24h, confirmando a saturação em água do material em 24 horas.

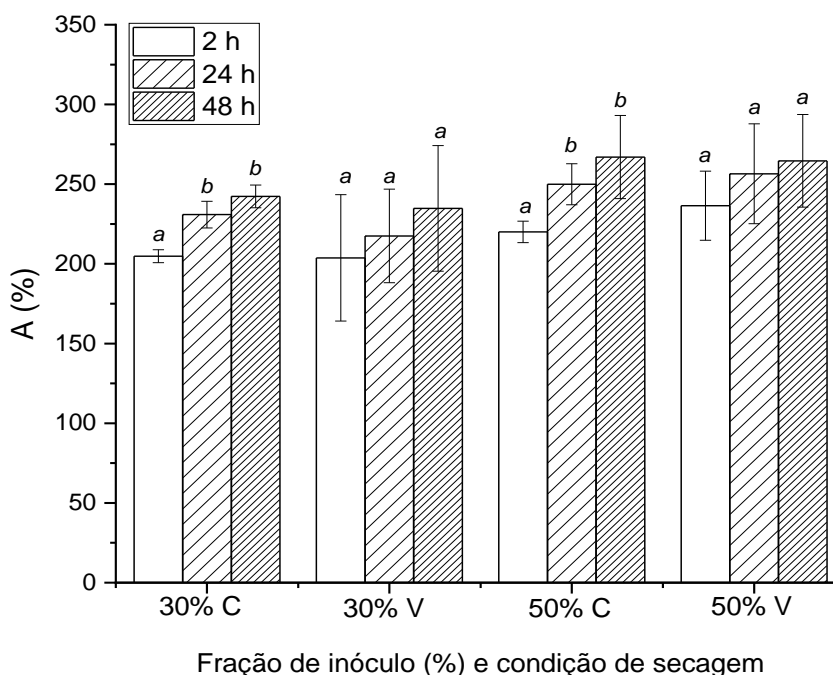


Figura 19 – Sorção de água (A%) em 2, 24 e 48 h de imersão dos biocompósitos com 30% e 50% de inóculo secos em estufa convencional (C) e em estufa à vácuo (V). Letras iguais entre as condições de secagem (vácuo ou convencional) significam valores sem diferença significativa pelo teste de Tukey com nível de confiança de 95%.

Fica claro na Figura 19 que depois de 2 horas de imersão, todos os biocompósitos sorveram pelos menos 200% de água independentemente da fração de inóculo e do tipo de secagem. Ainda, observa-se que os biocompósitos secos em estufa à vácuo não apresentaram diferença significativa de sorção de água entre 2, 24 e 48h, mostrando ter alcançado a saturação em 2h. Já, na secagem convencional, verifica-se diferença significativa entre 2 e 24h de imersão, indicando que em 2h os biocompósitos não sorveram a quantidade máxima de água, alcançando a saturação entre 2 e 24h, não havendo diferença significativa entre 24 e 48h.

De acordo com Sjöqvist *et al.* (2010), quanto maior a porosidade do material maior a capacidade de absorção de água por meio da entrada da água nos espaços vazios (poros), indicando uma menor densidade. Sabe-se que a quantidade inicial de inóculo poderia interferir na densidade micelial e consequentemente na densidade do material (CHANG E MILES, 2004). No entanto nos resultados da Figura 19, observa-se que as frações de inóculo de 30 e 50% apresentaram o mesmo comportamento em relação à sorção de água, mostrando ter porosidades e

densidades semelhantes. Já, o comportamento de sorção de água foi diferente nas condições de secagem convencional e a vácuo. Reis *et al.* (2006) ao secar fatias de beringela em estufa convencional e à vácuo na mesma temperatura de 65 °C observaram taxas de evaporação diferentes sendo $24,06 \times 10^{-3}$ kg água/h para o processo de secagem convectiva (convencional) e de $21,38 \times 10^{-3}$ kg água/h no processo de secagem a vácuo. Quando as fatias de beringela foram reidratadas as secas à vácuo demonstraram maior capacidade de reidratação (101,68%) enquanto as secas por convecção o teor de reidratação foi menor (37,41%). Comportamento similar foi observado para os biocompósitos com 50% de inóculo. Quando secos à vácuo, tiveram uma menor velocidade de secagem (5,18 g/dia - Tabela 1) e maior capacidade de reidratação, apresentando saturação em água em apenas 2 horas (Figura 19).

Na Tabela 2 são apresentados alguns resultados encontrados na literatura em relação à sorção de água em 2 e 24 h.

Observa-se na Tabela 2, que a menor sorção de água foi nos biocompósitos de Rocha (2018), com erva-mate e guaraná e 30% de *P. sajor-caju* e a maior sorção no trabalho de Pedri (2014) que usou fibras de pupunheira e *Lentinula edodes*.

As fibras vegetais possuem natureza hidrofílica em decorrência das hidroxilas presentes na celulose e na hemicelulose, por isso absorvem uma grande quantidade de água (IVANO, 2013). Isto foi observado também por Ziegler *et al.* (2016) quando obteve 300% de sorção de água após 50 h de exposição para um biocompósito feito de algodão e cânhamo (Quadro 2).

Tabela 2 – Comparação da sorção de água para diferentes biocompósitos com micélio fúngico secos em estufa convencional.

Biocompósitos	Inóculo	Sorção de água em 2 h (%)	Sorção de água em 24 h (%)	Referências
Papel cartão SBS + PET e <i>Pleurotus sajor-caju</i>	30%	204,8	230,9	Este trabalho
Papel cartão SBS + PET e <i>Pleurotus sajor-caju</i>	50%	220,1	249,9	Este trabalho
Erva mate e guaraná e <i>Pleurotus sajor-caju</i>	30%	37	80	Rocha (2018)
Bagaço de malte e folhas de bananeira e <i>P. sajor-caju</i>	30%	90	160	Deschamps (2020)
Fibras de pupunheira com <i>Lentinula edodes</i>	1/6 de placa de Petri	374	378	Pedri (2014)

Apesar da diferença expressiva na quantidade de água sorvida pelos biocompósitos desenvolvidos neste trabalho utilizando 30% de inóculo (230,9%) quando comparados aos biocompósitos produzidos por Rocha (2018) (80%), o comportamento da sorção foi similar no sentido de sorver menos água em 2h de imersão, atingindo o estado de saturação em até 24h. Já, os biocompósitos de Pedri (2014) atingiram o estado de saturação nas primeiras 2h de imersão (374%), assim como os biocompósitos secos à vácuo neste trabalho (Figura 19).

Os ensaios de sorção de água permitem avaliar propriedades como a estabilidade dimensional dos materiais, e os seus resultados podem ser considerados indicadores da adesão na interface fibra/matriz (CASTRO *et al.*, 2013). A absorção de água pode causar efeitos significativos nas propriedades físicas de um biocompósito afetando o desempenho mecânico e a durabilidade do material (DANTAS, 2011). Ziegler *et al.* (2016) constataram que à medida que a absorção de água aumentava as amostras perdiam a rigidez superficial e algumas partículas se soltavam da superfície, o mesmo aconteceu no presente trabalho. Segundo Ma *et al.* (2009), a sensibilidade à água é um critério importante para muitas aplicações práticas de biocompósitos, determinando assim o seu desempenho em condições adversas. Ou seja, quanto menor o teor de água absorvido, melhor o desempenho do material para uma possível aplicação em que o material se encontre em contato com água (CASTRO *et al.*, 2013). Para diminuir a absorção de água de um material deve-se aumentar a densidade ou revestir a superfície externa com um material hidrofóbico (KLYOSOV e KLESOV, 2007).

O gráfico representado pela Figura 20 apresenta a sorção de umidade do ar em corpos de prova de biocompósitos produzidos com 30% de inóculo (Figura 20a) e 50% de inóculo (Figura 20b), secos em estufa convencional e a vácuo, no período de 60 dias de exposição.

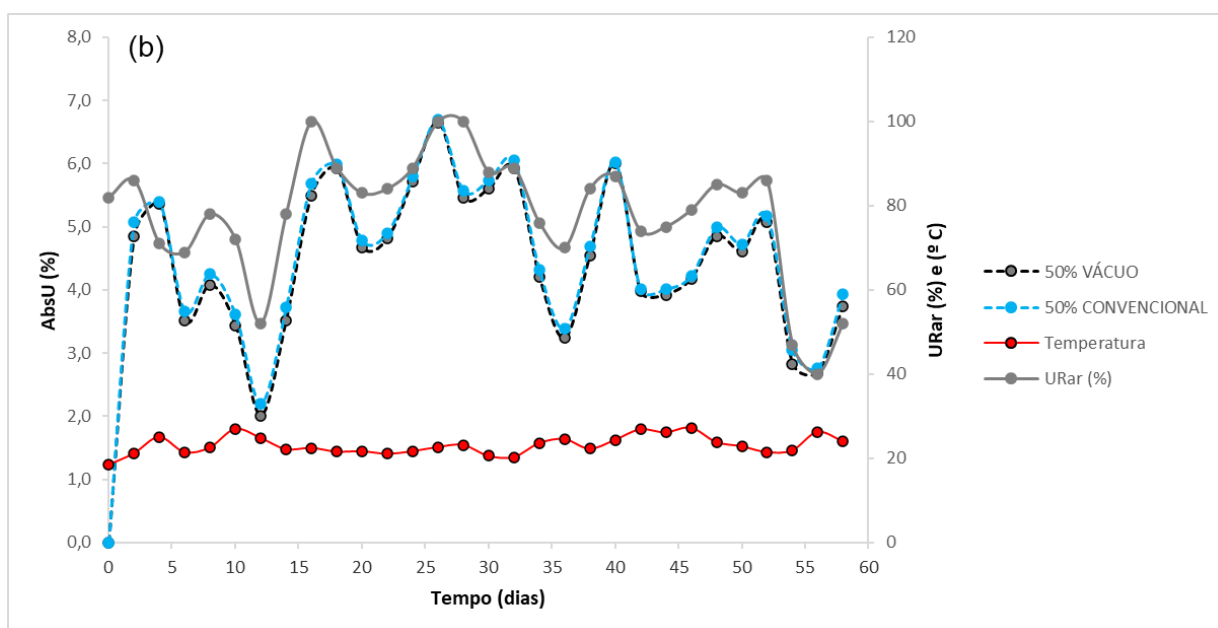
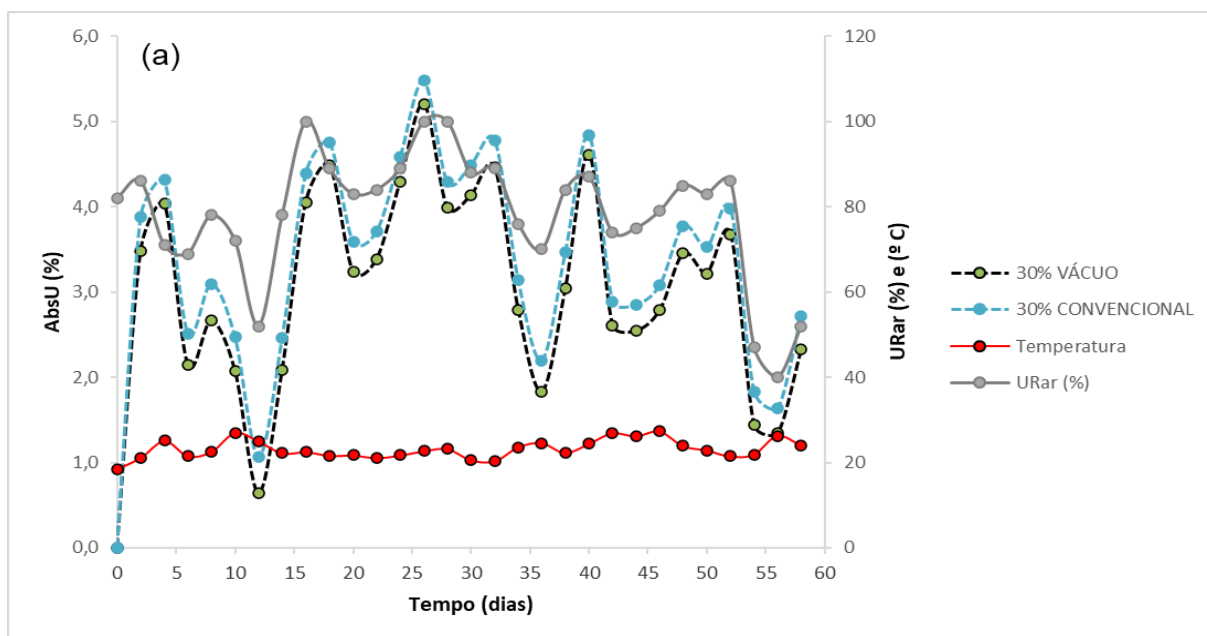


Figura 20 - Umidade do ar (Uar %) por tempo de exposição (dias) nos biocompósitos produzidos com 30% (a) e 50% (b) de inóculo e secos 60 °C em estufa convencional e à vácuo. As linhas na coloração vermelha e cinza referem-se à medida da temperatura ambiente (°C) e da umidade relativa do ar (URar%), respectivamente, no momento da pesagem.

Durante os 60 dias de exposição dos corpos de prova a temperatura ambiente variou de 12,3 a 31,8 °C, enquanto a umidade relativa do ar teve uma variação de 32 a 100%.

A sorção de umidade do ar é uma propriedade importante que determina a qualidade e a durabilidade do produto final (GIROMETTA *et al.*, 2019). A intenção desta análise foi simular a exposição do produto às condições ambiente.

Analisando os resultados na Figura 20, nota-se que todos os biocompósitos independente da sua fração de inóculo e condição de secagem, sofreram influência da umidade relativa do ar (URar %) acompanhando sua variação diária. Observa-se também que não houve variação de comportamento de Uar(%) entre os biocompósitos de mesma fração e tipos de secagem distintas. Nas Figuras 20a e 20b, tanto os biocompósitos secos em estufa convencional quanto os secos em estufa à vácuo, apresentam curvas coincidentes.

No entanto, o ponto máximo de sorção de umidade do ar foi em torno de 6,7% pelos corpos de prova com fração de inóculo de 50% (Figura 20b). Já os corpos de prova com fração de 30% apresentaram o ponto máximo de sorção de umidade em torno de 5,3%. Estes pontos máximos de sorção foram atingidos no mesmo 13º dia, o qual apresentou temperatura de 22,7 °C e 100% de umidade relativa do ar, lembrando que a pesagem das amostras era feita sempre no mesmo horário do dia.

Nota-se dessa forma que, a fração de inóculo influenciou a sorção de umidade do ar. Os biocompósitos, com frações de inóculo de 50%, apresentaram em média Uar de $4,6 \pm 1,1\%$ enquanto os biocompósitos com 30% de inóculo apresentaram uma sorção de umidade do ar significativamente menor ($3,3 \pm 1,1\%$) pelo teste de Tukey com 95% de confiança.

Rocha. (2018) e Deschamps (2020) também acompanharam a sorção de umidade do ar nos biocompósitos feitos com resíduos de erva-mate/guaraná e com bagaço de malte/folhas de bananeira, e, 30% de inóculo de *P. sajor-caju*. Rocha (2018) obtiveram uma sorção máxima da umidade do ar de 13,1% e Deschamps (2020) de 7,1%. Nos dois trabalhos, as temperaturas estavam em torno de 22 °C e URar em torno de 80%. Appels *et al.* (2019) analisaram o comportamento dos biocompósitos feitos de serragem de faia, palha de colza e fibras de algodão com *P. ostreatus* quando expostos a um ambiente com umidade relativa de 80% a 40 °C, e o biocompósitos apresentaram Uar de 11,6%.

Comparando os resultados da literatura aos obtidos no presente trabalho percebe-se que os biocompósitos feitos de papel cartão SBS revestido com PET sofreram menor influência da umidade relativa do ar, provavelmente devido a presença do PET, o que dificulta essa sorção. Constatou-se também, que a sorção

da umidade depende principalmente do substrato utilizado, mas pode sofrer a influência da espécie fúngica, pois alguns fungos possuem natureza hidrofóbica devido a algumas proteínas encontradas no micélio como hidrofobinas (ZIEGLER *et al.*, 2016).

Sabe-se que o aumento da umidade em algum produto promove a facilidade de contaminações microbianas. Entre os contaminantes mais frequentes de cultivos fúngicos, estão os gêneros *Trichoderma* e *Penicillium* na fase de incubação do substrato (SANCHES-VÁSQUEZ e ROYSE, 2001). Estes fungos apresentam micélio branco com esporulação escura, facilmente detectada a olho nu (CHA, 2004). Apesar da absorção de umidade do ar pelos biocompósitos (Figura 20), não foram observadas contaminações nos 60 dias de exposição ao ar ambiente.

Ainda, de acordo com Silva (2019) o desenvolvimento de fungos geralmente ocorre em materiais com umidade superior a 20% e o teor de umidade final (Tabela 1) encontrado no presente trabalho está em torno de 5%. Uma umidade final baixa é ideal para inibição do crescimento de fungos, tornando o biocompósito viável e funcional considerando sua vida útil em prateleira.

Na Figura 21 estão apresentados os resultados de tensão de compressão para os biocompósitos produzidos com frações de 30% e 50% de inóculo e secos a 60 °C em estufa convencional e à vácuo. Observa-se que a tensão de compressão não foi influenciada pela fração de inóculo e pelo tipo de secagem, ficando em torno de 0,16 MPa.

Deschamps (2020) utilizou como substrato para a produção de biocompósitos bagaço de malte e folhas de bananeira utilizando fração de inóculo de 30% de *Pleurotus sajor-caju*, obteve tensão de compressão de 0,015 MPa. Rocha (2018) para os biocompósitos de erva mate e guaraná, utilizando 10% de inóculo de *P. sajor-caju* obteve 0,094 MPa. Pedri (2014) analisou biocompósitos de fibra de pupunha e encontrou 0,23 MPa. Ghazvinian *et al.* (2019) cultivando *P. ostreatus* com substrato de palha, alcançou 0,02 MPa. Já Bruscato *et al.* (2019) obteve valor maior de resistência à compressão (0,4 MPa) nos biocompósitos com serragem e farelo de trigo utilizando *P. albidus*.

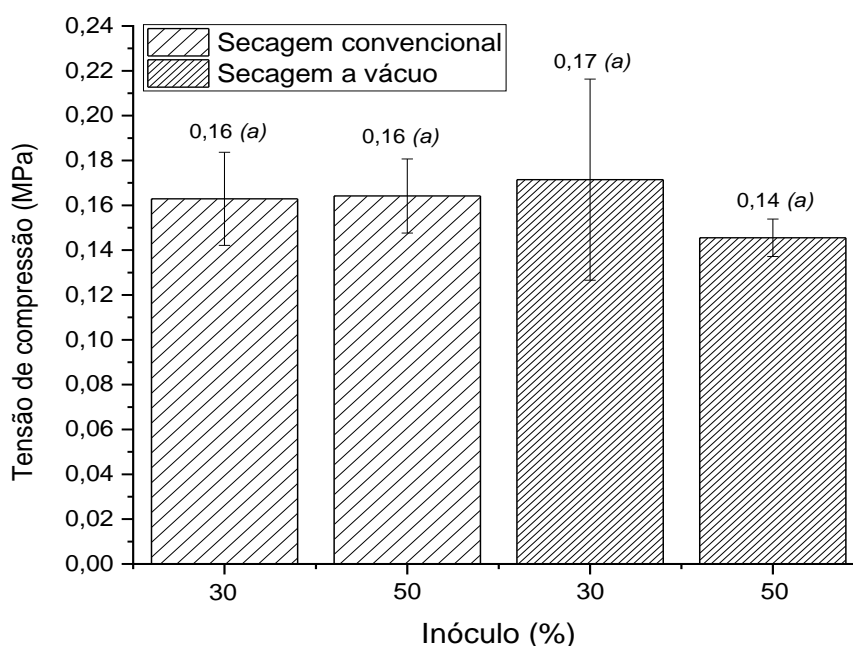


Figura 21 - Tensão de compressão para os corpos de prova dos biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* e secos em estufa à vácuo e convencional. Letras iguais significam valores sem diferença significativa pelo teste de Tukey com nível de confiança de 95%.

A resistência à compressão é uma das propriedades importantes para análise da aplicabilidade do biocompósito, pois sendo mais resistente sugere que sua durabilidade seja maior (YANG *et al.*, 2017). Algumas alternativas para melhoria da resistência à compressão são citadas na literatura, tais como o aperfeiçoamento de técnicas de fermentação, alterações genéticas ou bioquímicas (ATTIAS *et al.*, 2019), alteração de substrato, fungo e suplementação deste (JONES *et al.*, 2017) adição de látex ao substrato (HE *et al.*, 2014), adição de bio resina para estímulo do crescimento fúngico (JIANG *et al.*, 2013), adição de carboidratos para induzir um melhor desenvolvimento das hifas (TUDRYN *et al.*, 2018), entre outros.

A resistência a compressão encontrada no presente trabalho está entre os valores encontrados na literatura, o que não descarta a possibilidade de melhorar as condições de produção deste biocompósito para poder ser utilizado em embalagens. As propriedades mecânicas dos biocompósitos podem ser melhoradas adicionando a prensagem a frio ou a quente no processo, pois com a pressão aplicada a porosidade do material é reduzida, a densidade do material aumenta e as fibras são reorientadas no plano do material (JONES *et al.*, 2019; DAI *et al.*, 2007).

No Brasil, um dos principais produtos utilizados para embalagens é o EPS, popularmente conhecido como Isopor[®], marca registrada da empresa Knauf. É um plástico resultante da polimerização do estireno em água. O produto final são pérolas de até 3 milímetros de diâmetro, que se destinam à expansão por meio de vapor, fundindo-se e moldando-se em formas diversas (EPSBRASIL, 2019). De acordo com a NBR 11752 (ABNT, 2016), a resistência a compressão do EPS tipo 5, de densidade 22 kg/m³, deve estar entre 0,104 e 0,173 MPa. Portanto, a tensão de compressão obtida para o biocompósito em estudo se assemelha a este tipo de EPS.

As densidades aparentes dos biocompósitos são apresentadas na Figura 22. Verifica-se que para as frações de inóculo de 30% e 50% secos em estufa à vácuo não houve diferença estatisticamente significativa, ficando em torno de 300 kg/m³. Entretanto, as densidades dos biocompósitos secos em estufa convencional são estatisticamente diferentes, sendo 315 kg/m³ para a fração de 50% e 274 kg/m³ para a fração de 30%.

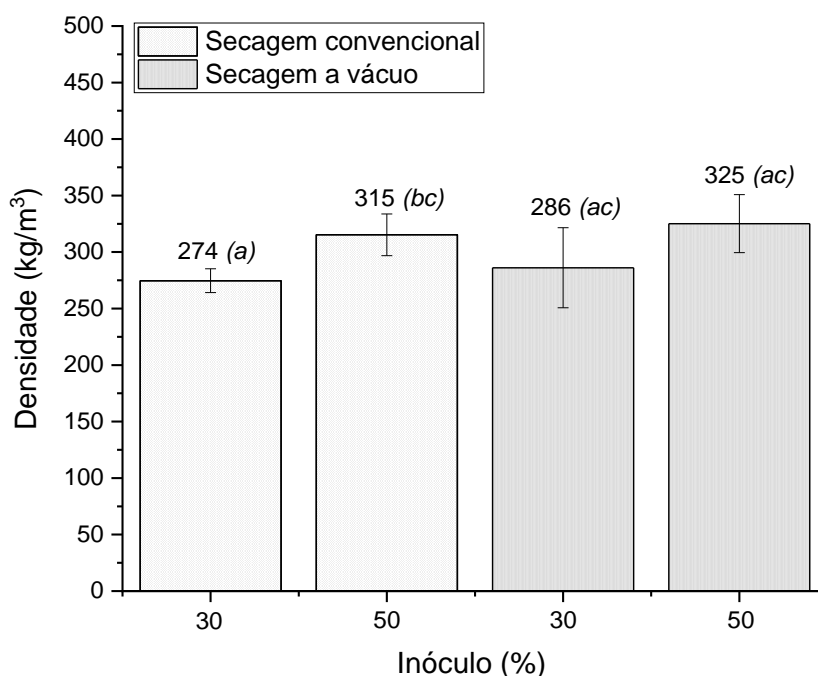


Figura 22 – Valores médios de densidade aparente para os corpos de prova dos biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo e secos em estufa à vácuo e convencional. Letras iguais significam valores sem diferença significativa pelo teste de Tukey com nível de confiança de 95%.

A densidade de materiais biocompósitos se altera conforme o substrato aplicado. Girometta *et al.* (2019) disserta em seu trabalho que a densidade do micélio isoladamente varia de 30 a 50 kg/m³. Biocompósitos produzidos a partir de resíduos agrícolas possuem densidade mais baixa (60 – 130 kg/m³) quando comparados aos produzidos com resíduos florestais, como por exemplo, a serragem (87 – 300 kg/m³) (JONES *et al.*, 2019), cânhamo (260 kg/m³) (LILIVELT *et al.*, 2015), bagaço de malte e folhas de bananeira (164 kg/m³) (DESCHAMPS, 2020). Os biocompósitos do presente estudo, que utilizou papel cartão com PET, se assemelham ao biocompósito produzido com cânhamo (LILIVELT *et al.*, 2015), em termos de densidade (248 a 266 kg/m³ - Figura 22). Portanto, mesmo sendo a densidade dos biocompósitos alta em relação ao EPS (10 a 30 kg/m³) (ABNT, 2016b), ainda assim, eles são mais leves que outros biocompósitos e como dito por Lopez *et al.* (2016), são leves o suficiente para serem utilizados em embalagens alimentares e de eletrodomésticos.

O desempenho térmico dos biocompósitos cultivados no substrato de papel cartão SBS revestido com PET e secos pelo método convencional ou à vácuo, pode ser avaliado a partir das curvas TG e DTG nas Figuras 23 e 24, respectivamente. Na Tabela 3 resume-se os principais dados obtidos nessas curvas.

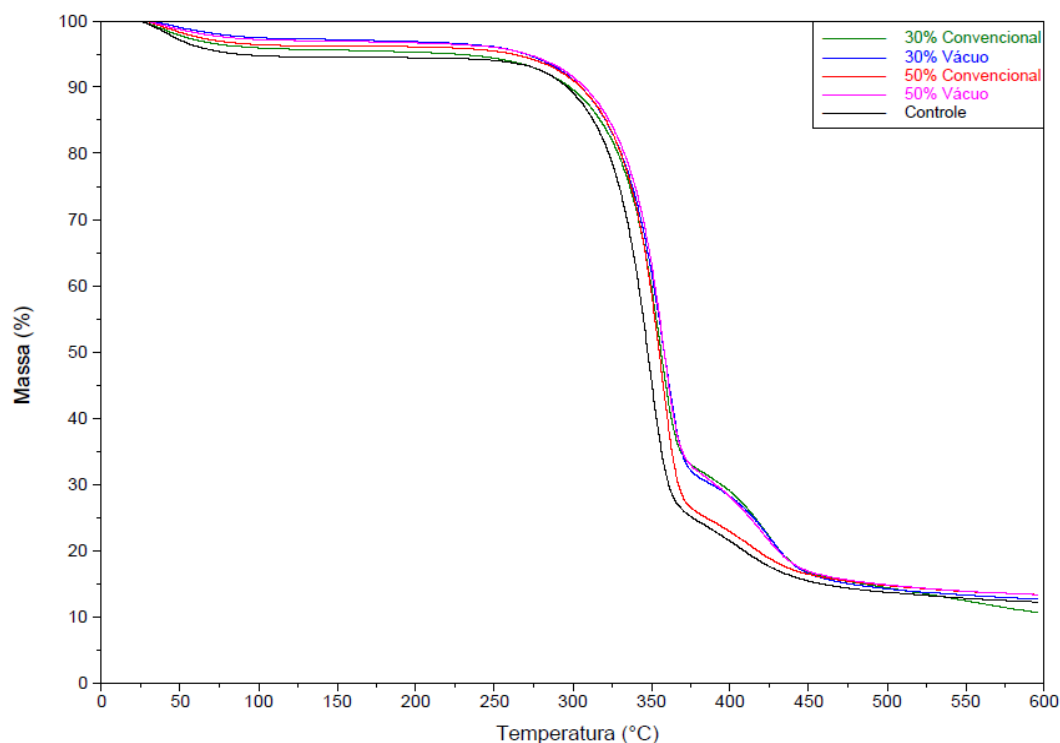


Figura 23 – Curvas TG para os biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* e secos em estufa à vácuo e convencional.

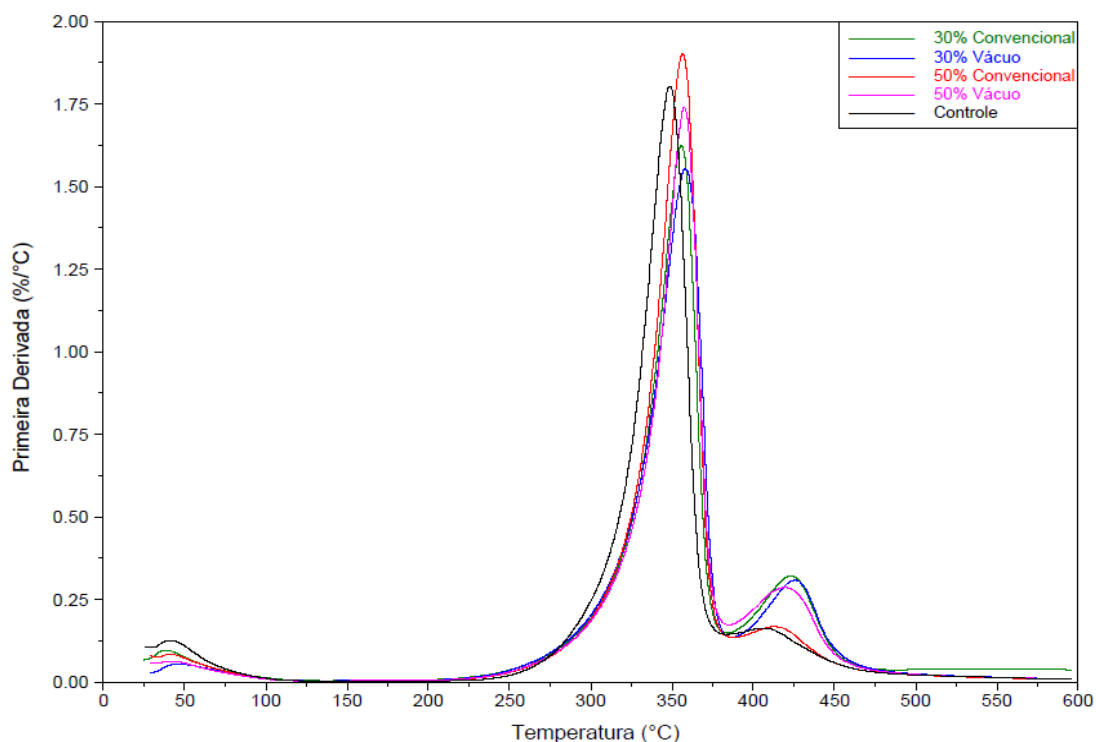


Figura 24 – Curvas DTG para os biocompósitos produzidos com 30 e 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* e secos em estufa à vácuo e convencional.

Tabela 3 – Dados da análise termogravimétrica dos biocompósitos cultivados no substrato de papel cartão SBS revestido com PET com 30 e 50% de inóculo e secos em estufa convencional e à vácuo.

Biocompósitos	Perda de massa 1 (%)	Perda de massa 2 (%)	T _{max2} (° c)	Perda de massa 3 (%)	T _{max3} (° c)	Resíduo (%)
Controle (SBS + PET)	5,442	69,47	<u>323,21</u>	12,84	<u>446,22</u>	12,23
			348,71		410,41	
30% convencional	4,351	63,82	<u>328,95</u>	21,21	<u>442,18</u>	10,63
			355,66		423,43	
30% vácuo	2,730	67,65	<u>328,56</u>	16,91	<u>449,83</u>	12,68
			358,37		426,56	
50% convencional	3,746	71,56	<u>331,04</u>	11,34	<u>448,30</u>	13,33
			356,46		416,65	
50% vácuo	3,018	65,81	<u>331,94</u>	17,85	<u>447,47</u>	13,32
			357,52		422,13	

Pelas curvas termogravimétricas TG (Figura 23) e DTG (Figura 24) foi possível observar 3 estágios de perda de massa para os biocompósitos produzidos em papel cartão SBS revestido com PET. O primeiro estágio pode ser relacionado à perda de água, que ocorre na faixa de 25 a 150/200 °C.

Para o biocompósito na fração de 30% de inóculo e secos em estufa à vácuo, esse primeiro evento térmico teve um menor percentual de perda de massa (2,730%) que nos demais eventos, indicando um menor percentual de umidade inicial do biocompósito cultivado, correspondendo a perda por evaporação de água superficial.

Observa-se duas temperaturas máximas (T_{max2}) associadas ao segundo estágio de degradação em cada um dos biocompósitos onde a condição de 50% de fração de inóculo se destacou com 331,94 e 357,52 °C, para secagem em estufa à vácuo e 331,04 e 356,46 °C em estufa convencional. Esses resultados mostram maior estabilidade térmica dos biocompósitos que o controle, pois temperaturas mais elevadas de início de degradação correspondem a maior estabilidade do material (ALEMDAR e SAIN, 2008), indicando que o micélio fúngico tem influência nesta estabilidade, pois o controle não tem micélio fúngico.

Rocha (2018) com biocompósitos cultivados nos substratos de erva-mate e guaraná *in natura* e residual com 10% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* e secos a 60 °C, também obtiveram três estágios de perda de massa. O primeiro estágio correspondeu a faixa de 30 a 150 °C, o segundo estágio foi analisado duas temperaturas máximas (T_{max2}), sendo 300 e 332 °C para o substrato *in natura* e 310 e 340 °C para o substrato residual. Haneef *et al.* (2017) com biocompósitos utilizando os fungos *G. lucidum* e *P. ostreatus* constataram a temperatura de degradação térmica na faixa de 225 a 300 °C. É constatado que esses materiais apresentam boa estabilidade térmica e resultados semelhantes aos observados neste trabalho, o que favorece também, a expansão dos seus campos de aplicação.

Nunes (2016), com o EPS puro analisou apenas um estágio de degradação térmica, iniciando em 355 °C e terminando em 440 °C, evidenciando que este material polimérico é mais estável que os resultados até o momento apresentados.

Observa-se duas temperaturas máximas associadas ao terceiro evento térmico (T_{max3}). A perda de massa do controle (12,84%) foi similar ao do biocompósito cultivado com 50% de inóculo e seco em estufa convencional (11,34%). Destaca-se que este biocompósito foi o que apresentou maior perda de massa no segundo evento (71,56%). Todos os demais biocompósitos apresentaram perda de massa superior ao controle, em temperaturas semelhantes.

O resíduo do controle obtido ao final do ensaio foi de 12,23%. Para os biocompósitos este valor variou de 10,63 a 13,33%, sendo que os biocompósitos com 50% de inóculo apresentaram uma similaridade neste valor. Haneef *et al.* (2017) obtiveram resultados similares a este trabalho com teor de resíduos entre 15 e 25% com biocompósitos de *G. lucidum* e *P. ostreatus*. Jones *et al.* (2017), em biocompósito de *Trametes versicolor*, obtiveram 25% de resíduo formado em 500 °C e evidenciaram que em temperaturas mais elevadas que essa última há quedas insignificantes de perda de massa para materiais baseados em micélio.

Avaliando todos os resultados obtidos, pode-se determinar que os biocompósitos com 50% de inóculo foram produzidos em um menor tempo, 16 dias, contra 21 dias para os produzidos com 30% (Figura 16 e Tabela 1). Ainda, observou-se que os biocompósitos secos em estufa convencional não sorveram a quantidade máxima de água em 2h de imersão, alcançando a saturação em 24h, sendo mais eficientes que os secos em estufa à vácuo. Assim, o processo de produção de biocompósitos utilizando 50% de inóculo secos em estufa convencional pode ser evidenciado como o melhor dentre as demais condições testadas. Este biocompósito apresentou a maior velocidade média de secagem (5,58 g/dia), de tensão de compressão de 0,16 MPa e 315 Kg/m³ de densidade aparente.

CONCLUSÕES

O presente trabalho foi desenvolvido com foco no aproveitamento e agregação de valor a resíduos produzidos pela indústria de embalagens. Para tanto, esses resíduos juntamente com a espécie fúngica *Pleurotus sajor-caju*, objetivaram a busca por soluções para os problemas ambientais relacionados a deposição final incorreta, por meio da sua transformação em um biomaterial (biocompósito fúngico). A utilização destes resíduos demonstrou potencial para a aplicação como um biocompósito.

Os corpos de prova do material biocompósito foram produzidos com 30 e 50% de inóculo de *Pleurotus sajor-caju* utilizando resíduos de papel cartão SBS revestido com PET como substrato e secagem dos biocompósitos em estufa convencional e estufa à vácuo a 60 °C. E dentre essas diferentes condições de avaliação, a condição de 50% de inóculo resultou em maior velocidade de crescimento micelial e de secagem do tipo convencional. Essa condição apresentou menor tempo global de processo, 16 dias e velocidade de secagem de 5,58 g/dia.

Em relação as metodologias de secagem, os biocompósitos com 50% de fração de inóculo e secos em estufa convencional pôde ser evidenciado como melhor dentre as demais condições testadas, pois apresentou resistência à compressão de 0,16 MPa, na absorção de água alcançaram a saturação em até 24h, pois não houve diferença significativa entre 24 e 48h de imersão, absorção de umidade em média U_{ar} de $4,6 \pm 1,1\%$, apresentaram maior velocidade de secagem (5,58 g/dia), são termicamente estáveis (331,04 e 356,46 °C) e com densidade aparente de 325 kg/m³.

Os biocompósitos cultivados em substrato de papel cartão revestido com PET com 50% de fração de inóculos e secos a 60 °C, apresentaram potencial para ser aplicados como substituinte ao poliestireno expandido (EPS tipo 5) devido a tensão de compressão obtida para o biocompósito em estudo ser semelhante a EPS, além de serem materiais seguros, que dispõe de alta resistência à temperatura e de fácil degradação. Em contrapartida, o EPS libera gases voláteis inflamáveis e tóxicos durante sua combustão, aumentando o risco de incêndio, além de também, ter elevado tempo de decomposição.

Sugere-se que novos estudos devam ser realizados para verificar a resistência do biocompósito ao impacto, à tração, à flexão, à chama. Experimentos de biodegradação em solo, exposição ao intemperismo natural e a adição de uma bioresina ou aumento do tempo de incubação, poderiam melhorar a compactação e o crescimento do micélio, possibilitando sua posterior aplicação na produção de embalagens.

REFERÊNCIAS

ABIPET, Associação Brasileira da Indústria do PET. **Censo de Reciclagem PET no Brasil**. Disponível em: <<https://www.abipet.org.br>>. Acesso em: 06 dez 2021.

ABIPLAST, Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Perfil 2020**. Disponível em: <<http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2020/>>. Acesso em: 14 ago 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ISO TR 14.062/2014: Gestão Ambiental – Integração de Aspectos Ambientais no Projeto e Desenvolvimento do Produto**. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8082: Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmica – Determinação da resistência a compressão**. Rio de Janeiro, 2016.

ABRE, Associação Brasileira de Embalagens. **Dados do setor**. Disponível em: <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2020-2/>>. Acesso em: 21 ago 2021.

ABRELPE, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 15 dez 2021.

AGENDA SUSTENTÁVEL., 2009 **Hidrapulper-Klabin**. Disponível em: <<https://www.agendasustentavel.com.br>> Acesso em: 13 nov 2021.

AGUSTINA, W.; ADITIAWATI, P.; KUSUMAH, S.S.; DUNGANI, R. Physical and mechanical properties of composite boards from the mixture of palm sugar fiber and cassava bagasse using mycelium of *Ganoderma lucidum* as a biological adhesive, **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, 374., 2019.

AKCELRUD, L. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**. Editora Manole Ltda, São Paulo, 2007.

ALEMDAR, A; SAIN, M. Biocomposites from wheat straw nanofibers: Morphology, thermal and mechanical properties. **Composites Science and Technology**, v. 68, p. 557-565, 2008.

AMAZONAS, A. ANPC – **Associação Nacional dos Produtores de Cogumelos**, 2013. Disponível em: <<https://www.anpccogumelos.org>> Acesso: 30 nov. 2021.

ANCAT. **Anuário da Reciclagem 2021**. Disponível em: <<https://www.ancat.org.br/blog/anuario-da-reciclagem-2021-retrata-a-realidade-dos-catadores-de-materiais-reciclaveis-e-de-suas-organizacoes-no-brasil>> Acesso: 30 mar 2022.

APPELS, F.V.W.; CAMERE, S.; MONTALTI, M.; KARANA, E.; JANSEN, K.M.B.; DIJKSTERHUIS, J.; KRIJGSHELD, P.; AND WOSTEN, H.A.B. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites, **Materials and Design**, v. 161, p. 64-71, 2019.

ARCHDAILY. **Construindo com cogumelos: o refúgio à base de micélio em Bariloche, Argentina**. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/971686/construindo-com-cogumelos-o-refugio-a-base-de-micelio-em-bariloche-argentina?ad_source=search&ad_medium=projects_tab&ad_source=search&ad_medium=search_result_all>. Acesso em 04 de set. 2021.

ARORA, D.K.; ELANDER, R.P.; MUKERJI, K.G. **Handbook of applied mycology**, v.4, New York: Marcel Dekker, 1992.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **D570-95: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics**. New York, 1998.

ATTIAS, N.; DANAI, O.; ABITBOL, T.; TARAZI, E.; EZOV, N.; PEREMAN, I.; GROBMAN, Y.J. Mycelium biocomposites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. **Journal of Cleaner Production**. 2019.

ATTIAS, N.; DANAI, O.; TARAZI, E.; GROBMAN, Y. J. Developing novel applications of mycelium-based bio-composite materials for architecture and design. **Building with bio-based materials: best practice and performance specification**. September 6th-7th. Zagreb, Croatia. 2017.

BAJWA, D. S.; HOLT, G. A.; BAJWA, S. G.; DUKE, S. E.; MCINTERE, G. Enhancement of térmite (*Reticulitermes flavipes* L.) resistance in mycelium reinforced biofiber-composites. **Industrial Crops & Products**, 2017.

BARBOSA, L.A.; DREGER, A.A.; SCHNEIDER, E.L.; MORISSO, F.D.P.; SANTANA, R.M. Polietileno de baixa densidade - PEBD: mercado, produção, principais propriedades e aplicações. **Revista Espacios**, v. 38 (Nº 17) Pág. 10. 2016.

BAYER, E.; MCINTYRE, G.; e SWERSEY, B.L. **Method for producing grown materials and products made thereby**. U.S. Patent Application US 2008 0145577 A1, Jun. 2008.

BONATTI, M.; KARNOPP, P.; SOARES, H.M.; FURLAN S.A. Evaluation of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus sajor-caju* nutritional characteristics when cultivated in different lignocellulosic wastes. **Food Chem.**, v. 88, p. 425-428, 2004.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 313/2002**. "Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais". Brasília, out. 2002b.

_____. **Resolução de Diretoria Colegiada nº 259, de 20 de setembro de 2002**. Aprova o "Regulamento Técnico sobre Rotulagem de Alimentos Embalados". Órgão emissor. Brasil, set. 2002a.

_____. **Resolução de Diretoria Colegiada nº 20, de 26 de março de 2008**. Aprova o "Regulamento Técnico sobre embalagens de polietilenotereftalato (PET) pós-consumo reciclado grau alimentício (PET-PCR grau alimentício) destinados a entrar em contato com alimentos. Brasília, mar. 2008.

_____. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, ago. 2010a.

_____. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, dez. 2010b.

BRUSCATO, C.; MALVESSI, E.; BRANDALISE, R.N.; CAMASSOLA, M. High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust d Sustainable technology for waste reduction. **Journal of cleaner production**, v. 234, p. 225-232, 2019.

CALLISTER, W.D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CASTRO, D. O.; FROLLINI, E.; MARINI, J.; RUVOLO-FILHO, A. Preparação e caracterização de biocompósitos baseados em fibra de curauá, biopolietileno de alta densidade (BPEAD) e polibutadieno líquido hidroxilado (PBHL). **Polímeros**, v. 23, n. 1, p. 65-73, 2013.

CHA, J.S. Pest and Disease Management. In: **Mushroom grower's handbook – Oyster mushroom cultivation**, (Mushroom Ed.), Seoul, Mushword-Heineart Inc, pp. 172-186, 2004.

CHANG, S.T.; MILES, P.G. **Mushrooms: cultivation, nutritional value, medicinal effect and environmental impact**. New York: CRC Press, 451 p., 2004.

CHANG. S.T.; WASSER, S.P. The Cultivation and Environmental Impact of Mushrooms. **Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science**, 2017.

COMPOSITE MATERIAL. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/composite-material>>. Acesso em 10 jun. 2020.

CUNHA, E.C. **Placas recicladas de embalagens longa vida: caracterização, design e propostas projetuais**. Tese de Doutorado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

DAI, C.; YU, C.; ZHOU, X. Heat and mass transfer in wood composite panels during hot pressing. Part II. Modeling void formation and mat permeability, **Wood and Fiber Science**, v.37, n.2, p. 242-257, 2007.

DANTAS, C.M. **Influência da quantidade de absorção de água nas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos de manta de fibra de vidro, híbrido e**

tecido juta. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 96 p., 2011.

DAMBRÓS, P.; CAPPELARI, K.; POFFO, C.; WISBECK, E. Avaliação da biodegradação de polímeros por *Pleurotus djamor*. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, n. 31, p. 21-29, 31 mar. 2014.

DEACON, J.W.; **Fungal Biology**. Blackwell-Wiley, ed 4.; p. 384, Oxford, UK, 2006.

DEZEEN. **Mycelium Design**. Disponível em: <<https://www.dezeen.com/tag/mycelium-design/>> Acesso em 04 de set. 2021

DESCHAMPS, J.LN. Produção e caracterização de biocompósitos obtidos do cultivo de ***Pleurotus sajor-caju* em substrato composto por bagaço de malte e folhas de bananeira**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville. Joinville, 2020.

DIAS, L.G. **Estudo do processo de secagem em estufa e por microondas de compósitos cerâmicos de argila e resíduos de esteatito**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São João del Rei, 2013.

DUPRAT, M.F.L.B.; RAMPINELLI, J.R.; LIMA, S.G.; SILVA, D.A.K.; FURLAN, S.A.; WISBECK, E. Potencial nutritivo de cogumelos *Pleurotus ostreatus* cultivados em folhas de pupunheira. **B. CEPPA: Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 33, n. 1, p.18-29, 2015.

ECOVATIVE. **About**. Disponível em:< <https://ecovative.com/press>>. Acesso em 20 out. 2021.

EFING, A.C.; PAIVA, L.L. Consumo e obsolescência programada: sustentabilidade e responsabilidade do fornecedor. **Revista de Direito, Globalização e Responsabilidade nas Relações de Consumo**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 117-135, 2016.

ELSACKER, E.; VANDELOOK, S.; BRANCART, J.; PEETERS, E.; DE LAET, L. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. **PLoS ONE**, v. 14, n. 7, 2019.

EPSBRASIL. Disponível em: <<http://www.epsbrasil.eco.br/eps/index.html>>. Acesso em dez. 2020.

FARIA, P.C.; WISBECK, E.; DIAS, L.C. Biodegradação de polipropileno reciclado (ppr) e de poli (tereftalato de etileno) reciclado (petr) por *Pleurotus ostreatus*. *Matéria* (Rio de Janeiro) [online]. 2015, v. 20, n. 2, pp 452-459, 2015.

FERREIRA, A.R.S.V.; FILHO, F.G.R.; MELO, V.A. Embalagens cartonadas assépticas: uma revisão sobre os métodos de reciclagem mais empregados. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p.46336-46349 jul. 2020.

FERREIRA, L.C. A problemática dos resíduos sólidos urbanos e o descarte de máscaras respiratórias de uso não profissional. **Revista Pesquisa urbana**, ISSN 2178-1699, 2020.

FERREIRA, M.G.O.; BILAR, A.B.C.; MOURA, F.F.S.; FERREIRA, L.R.; RIBEIRO, E.P. Solid waste management and environmental education from the perspective of workers of a cooperative recycling. **Revista Geama**, Pernambuco, v. 5, n. 1, p. 94-102, 2016.

FERREIRA, O.P.; ALVES, O.L.; MACEDO, J.S.; GIMENEZ, I.F.; BARRETO, L.S. Ecomateriais: desenvolvimento e aplicação de materiais porosos funcionais para proteção ambiental. **Química Nova**, v. 30, n. 2, 2007.

FERRI, G. N. **Utilização do resíduo de papel cartão revestido com PET na remoção biológica de corante rodamina B.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, 2015.

FURLAN, S.A.; VIRMOND, L.J.; MIERS, D.A.; BONATTI, M.; GERN, R.M.M.; JONAS, R. Mushrooms strains able to grow at high temperatures and low pH values. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 13, n. 6, p. 689-692, 1997.

GHAZVINIAN, A.; FARROKHSIAR, P.; VIEIRA, F.; PECCHIA, J.; GURSOY, B.; Mycelium -Based Bio-Composites for Architecture: Assessing the effects of cultivation factors on Compressive Strenght. **Material Studies and Innovation**, v.2, 2019.

GHOSH, T. **Developing a compopsite mycelium glass brick unit**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, na Universidade de Oklahoma. 95p., 2018.

GIROMETTA, C.; PICCO, A.M.; BAIGUERA, R.M.; DONDI, D.; BABBINI, S.; CARTABIA, M.; PELLEGRINI, M.; SAVINO, E. Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: A review. **Sustainability**, v. 11, 2019.

GONZÁLEZ, T.B.; DOMÍNGUEZ, M.S.; BAUTISTA, S.A. Cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* var Florida sobre fibra de coco y pulpa de café. **Revista Mexicana de Micología**, v.9, p.13-18, 1993.

GREGORI, A.; SVAGELJ, M.; PAHOR, B.; BEROVIC, M.; POHLEVEN, F. The use of spent brewery grains for *Pleurotus ostreatus* cultivation and enzyme production. **New Biotechnology**, v. 2, n. 2/3, p. 157-161, 2008.

HANEEF, M.; CESERACCIU, L.; CANALE, C.; BAYER, I.S.; GUERRERO, J.A.H.; ATHANASSIOU, A. Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties. **Scientific Reports**, 2017.

HE, J.; CHENG, C.M.; SU, D.G.; ZHONG, M.F. Study on the Mechanical Properties of the Latex-Mycelium Composite. **Applied Mechanics and Materials**, v. 507, p. 415–420, 2014.

HEISEL, F.; LEE, J.; SCHLESIER, K. Design, Cultivation and Application of Load-Bearing Mycelium Components: The MycoTree at the 2017 Seoul Biennale of Architecture and Urbanism. **Sustainable Construction**. v. 6, n. 1, p. 296–303, 2017.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos industriais: Relatório de pesquisa**. Brasília, 2020.

ISLAM, M.R.; TUDRYN, G.; BUCINELL, R.; SCHADLER, L.; PICU, R.C. Morphology and mechanics of fungal mycelium. **Scientific Reports**, v. 7, 2017.

ITO, D. Desenvolvimento de materiais de embalagens para forno de microondas. **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens**, v. 21, 2009.

IVANO, L.R.P F.M. **Bandejas biodegradáveis a base de amido de mandioca e resíduo fibroso da indústria cervejeira**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

JIANG, L.; WALCZYK, D.; MCINTYRE, G.; BUCINELL, R.; TUDRYN, G. Manufacturing of biocomposite sandwich structures using mycelium-bound cores and preforms. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 28, p. 50-59, 2017.

JIANG, L.; WALCZYK, D.; MOONEY, L.; PUTNEY, S. **Manufacturing of mycelium-based biocomposites**. Conference Paper, 2013.

JOHANSSON, C.; BRAS, J.; MONDRAGON, I.; NECHITA, P.; PLACKETT, D.; SIMON, P.; SVETEC, D. G.; VIRTANEN, S.; BASCHETTI, M. G.; BREEN, C.; CLEGG, F.; AUCEJO, S. Renewable fibers and bio-based materials for packing applications – A review of recente developments. **BioResources**, v.7, n.2, p. 2506-2552, 2012.

JONES, M.; HUYNH, T.; DEKIWADIA, C.; DAVER, F.; JOHN, S. Mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics. **Journal of Bionanoscience**, v. 11, n. 4, p. 241–257, 2017.

JONES, M.; MAUTNER, A.; LUENCO, S.; BISMARCK, A.; JOHN, S. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. **Materials & Design**, 2019.

JORGE, N. Embalagens para alimentos. **Cultura Acadêmica**. Pró-Reitoria de Graduação, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2013.

KARAGIANNIDIS, P.G.; STERGIU, A.C.; KARAYANNIDIS, G.P. Study of Crystallinity and Thermomechanical Analysis of Annealed Poly (ethylene terephthalate) Ffilms. **European Polymer Journal**, v. 44, pp. 1475–1486, 2007.

KENIG-WITKOWSKA, M. The concept of sustainable development in the European Union policy and law. **Journal of Comparative Urban Law and Policy**, [S. I.], v. 1, n. 1, p. 64-80, 2017.

KOHARI, E. K.; AMAZONAS, M. A. L. de A.; CARVALHO, F. J. P. de C. **Potencial de crescimento micelial do fungo *Pleurotus sajor-caju* em serragem e casca de *Pinus spp.* e resíduo de infusão de erva-mate.** Universidade Federal do Paraná. Embrapa-Florestas. 1997.

KONG, W.S. Descriptions of commercially important *Pleurotus* species. **Mushroom grower's handbook – Oyster mushroom cultivation**, Mushroom Ed., Seoul, Mushroom-Heineart, 2004.

KLYOSOV, A.A.; KLESOV, A.A. **Wood-plastic composites.** Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2007.

LANDIM, A.P.; BERNARDO, C.O.; MARTINS, I.B.A.; FRANCISCO, M.R.; SANTOS, M.B., MELO, N.R. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v.26. São Carlos, 2016.

LI, X.; PANG, Y.; ZHANG, R. Compositional changes of cottonseed hull substrate during *Pleurotus ostreatus* growth and the effects on the feeding value of the spent substrate. **Bioresource Technology**, v. 80, 2001.

LILIVELT, R.J.J.; LINDNER, G.; TEUFFEL, P.M.; LAMERS, H. M. The production process and compressive strength of mycelium-based materials. **First International Conference on Bio-based Building Materials**, Clermont-Ferrand, France, 2015.

LIU, R.; LONG, L.; SHENG, Y.; XU, J.; QIU, H.; LI, X.; WU, H. Preparation of a kind of novel sustainable mycelium/cotton stalk composites and effects of pressing temperature on the properties. **Industrial Crops and Products**, v. 141, 2019.

LOPEZ, J.A.N.; MENDEZ, G.J.; RUELAS, X.C.; NAJERA, J.A.L. Assessment of edible fungi and films bio-based material simulating expanded polystyrene. **Materials Manuf. Process.** v. 31, p.1085 -1090, 2016.

MA, X.; CHANG, P. R.; YU, J.; STUMBORG, M. Properties of biodegradable citric acid-modified granular starch/thermoplastic pea starch composites. **Carbohydrate Polymers**, v. 75, p. 1-8, 2009.

MAHAJAN, G.V.; AHER, V. S. **Composite Material: A Review over Current Development and Automotive Application.** **International Journal of Scientific and Research Publications**, Volume 2, Issue 11, 2012.

MENON, A.S.; MUJUMDAR, A.S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: Mujumdar, A.S. **Handbook of Industrial Drying.** New York: Marcel Dekker Inc, cap. 9, p. 295-326, 1987.

MODA, E.M.; HORII, J.; SPOTO, M.H.F. Edible mushroom *Pleurotus sajor-caju* production on washed and supplemented sugarcane bagasse. **Scientia Agricola**, v.62, p.127-132, 2005.

MOHANTY, A.K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 276/277, p. 1–24, 2000.

MOLENA, O. **O moderno cultivo de cogumelos.** São Paulo: Nobel, 1989.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** Lavras: UFLA, 2006.

NEVES, F.L. Novos desenvolvimentos para reciclagem de embalagens longa vida. **37° Congresso Internacional de Celulose e Papel**, São Paulo, 2004.

OEI, P. **O cultivo de cogumelos em pequena escala.** Fundação Agromisa e CTA, 2006.

NASCIMENTO, J.S.; MORAES, V.S.; BERNARDI, E.; SILVA, S.D.A. Cultivo de *Pleurotus ostreatus* em substratos formulados com casca de mamona, bagaço de cana-de-açúcar e palha de arroz. Congresso Brasileiro de Mamona, 3 ed. **Energia e ricinoquímica: anais.** Salvador: SEAGRI: Embrapa Algodão, 2008.

PACKAGING DIGEST. Disponível em: <<https://www.packagingdigest.com/medical-packaging/introduction-managing-changes-revalidations-sbs>>. Acesso em 16 out. 2021.

PEDRI, Z.C. **Uso de biomassa lignocelulósica e *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler para desenvolvimento de um biocompósito.** Dissertação (Mestrado em

Engenharia Ambiental), Universidade Regional de Blumenau (FURB), Blumenau, 2014.

PELLETIER, M.G.; HOLT, G.A.; WANJURA, J.D.; LARA, A.J.; TAPIA-CARILLO, A.; MCINTYRE, G.; BAYER, E. An evaluation study of pressure-compressed acoustic absorbers grown on agricultural by-products. **Industrial Crops and Products**, v. 95, p. 342-347, 2017.

POPPE, J. Use of agricultural waste materials in the cultivation of mushrooms. **Mushroom Science**, 2000.

RAVEN, P.H. **Biologia Vegetal**. Rio de Janeiro. Guanabara Koogan. 2001.

REIS, F.R.; MASSON, M.L.; WASZCZYNSKYJ, N. Efeitos da secagem convectiva e a vácuo sobre parâmetros de qualidade de fatias de berinjela. **Revista brasileira de produtos agroindustriais**, v8, n2, p. 163-169, 2006.

RIDZQO, I.F.; SUSANTO, D.; PANJAITAN, T.H.; PUTRA, N. Sustainable Material: Development Experiment of Bamboo Composite Through Biologically Binding Mechanism. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 713, 2020.

ROCHA, M.I. **Produção de biocompósitos de *Pleurotus sajor-caju* utilizando resíduos de erva-mate e guaraná**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville. Joinville, 2018.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M.A.S., DE PAOLI, M.A. “Poli (Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem”, **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 19, n. 2, pp. 121-132, 2009.

RORABACHER, D.B. Statistical treatment for rejection of deviant values: critical values of Dixon's “Q” parameter and related subrange ratios at the 95% confidence level. **Analytical Chemistry**, v. 63, n. 2, p.139-146, 1991.

SANTOS, E.R.D. **Material Complementar ao livro Sistemática Vegetal I: Fungos**. Florianópolis, 2015.

SANTOS, R.; MARTINS, J. G. **Materiais de Construção Plásticos**. Série Materiais 2ª Edição. Universidade Fernando Pessoa, 2010.

SCHULZ, J.G. **Estudo da Produção de *Pleurotus sajor-caju* em resíduo de cervejaria (bagaço de malte)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Joinville, 2016.

SHINOJ, S.; VISVANATHAN, R.; PANIGRAHI, S.; KUCHUBABU, M. Oil palm fiber (OPF) and its composites: a review. **Industrial Crops and Products**. n. 33. p. 7 e 22. 2011.

SILVA, M. C. P. **Avaliação da eficiência biológica e produtiva, de substrato a base de bambu *Dendrocalamus asper*, para a produção de *Pleurotus ostreatus* e *Pleurotus sajor-caju***. 2019. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2019.

SILVA, R.R.; COELHO, G.D. **Fungos principais grupos e aplicações biotecnológicas**. São Paulo, SP: Instituto de Botânica - IBt. 2006.

SIMPSON, W.T.; TSCHERNITZ, J.L. Solar dry kiln for tropical latitude. **Forest Products Journal**, v.34, n.5, p. 25-34, 1984.

SMITH, W.B.; SMITH, A. **Radio-frequency/vacuum drying of red oak energy quality value**. Proc. 4 th IUFRO Int Wood Drying Conf Rotorua NZ, 263-270, 1994.

SNS, Secretaria Nacional de Saneamento (SNS) do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, 2018**. Disponível em: < <http://www.snis.gov.br/diagnosticos> > Acesso em: 17 nov 2021.

SRIDACH, W.; HODGSON, K. T.; NAZHAD, M. M. Biodegradation and Recycling Potential of Barrier Coated Paperboards. **BioResources**, [S. l.] v. 2, n. 2, p. 179-192, 2006.

SJÖQVIST, M.; BOLDIZAR, A.; RIGDAHL, M. Processing and Water Absorption behaviour of foamed potato starch. **Journal of Cellular Plastics**, p. 1-22, 2010.

THOMAZ C.S. **Avaliação de metodologia de obtenção do ácido terftálico via reciclagem química do PET**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

TRABULSI, R.L.; ALTERTHUM, F.; CANDEIAS, N.A.J; GOMPERTZ, F.O. **Microbiologia. 3a ed.**, São Paulo: Atheneu, 1999.

TUDRYN, G.J.; SMITH, L.C.; FREITAG, J.; BUCINELL, R.; SCHADLER, L.S. Processing and morphology impacts on mechanical properties of fungal based biopolymer composites, **Journal of Polymers and the Environment**, v. 26, n. 4, p. 1473-1483, 2018.

VEGA, F.E.; MEYLING, N.; LUANGSA-ARD, J.; BLACKWELL, M. Fungal Entomopathogens. **Insect Pathology**, 2012.

VERMA, D; JAIN, S; ZHANG, X; GOPE, P C. **Green approaches to biocomposite materials science and engineering**. IGI Global, 2016.

WEBSTER, J. **Introduction to fungi**, 2 ed. Cambridge: Cambridge University, 1980.

WESTPHAL, M. S. **Utilização de resíduos da indústria de aromas (guaraná, carvalho, cacau e mate) na produção de Pleurotus sajor-caju**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade da Região de Joinville (UNIVILLE), Joinville, 2017.

YANG, Z.; ZHANG, F.; STILL, B.; WHITE, M.; AMSTISLAVSKI, P. Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 7, 2017.

ZAMPAROLLI, D.; JORGE, C. - **Revista Plástico Moderno: PET reciclado grau alimento promete revolução**. p.33-40, 2008.

ZIEGLER, A.R.; BAJWA, S.G.; HOLT, G.A.; MCINTYRE, G.; BAJWA, D.S. Evaluation of physico-mechanical properties of mycelium reinforced green biocomposites made from cellulosic fibers. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 32, n. 6, p. 931-938, 2016.

