

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica

Carla Queiroga Werkhaizer

**GLUON: uso do potencial micológico e biofabricação digital
para o desenvolvimento de biopolímeros
compostáveis e regenerativos**

Belo Horizonte
2024

Carla Queiroga Werkhaizer

GLUON: uso do potencial micológico e biofabricação digital para o desenvolvimento de biopolímeros compostáveis e regenerativos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de Mestre em Gestão da Inovação e Empreendedorismo.

Orientador: Prof. Dr. Aristóteles Góes Neto

Coorientador: Profa. Dra. Caroline Salvan Pagnan

Belo Horizonte
2024

Ficha Catalográfica

W488g
2024
D Werkhaizer, Carla Queiroga.
GLUON [manuscrito] : uso do potencial micológico e biofabricação digital para o desenvolvimento de biopolímeros compostáveis e regenerativos / Carla Queiroga Werkhaizer. 2024.

1 recurso online (66 f. : il., gráfs., tabs., color.) : pdf.

Orientador: Aristóteles Góes Neto.

Coorientadora: Caroline Salvan Pagnan.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Química (Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica).
Bibliografia: f. 64-66.

1. Inovações tecnológicas – Teses. 2. Biopolímeros – Teses. 3. Resíduos – Reaproveitamento – Teses. 4. Compósitos poliméricos – Teses. 5. Fungos – Biotecnologia – Teses. 6. Micélio – Teses. 7. Biotecnologia – Indústria – Teses. 8. Biomassa vegetal – Teses. I. Góes Neto, Aristóteles, Orientador. II. Pagnan, Caroline Salvan, Coorientadora. III. Título.

CDU 043



UFMG
UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS

**ATA DA SESSÃO DE DEFESA DA 23ª DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE MINAS GERAIS, DA DISCENTE CARLA QUEIROGA
WERKHAIZER Nº DE REGISTRO 2021729472.**

Aos 16 (dezesesseis) dias do mês de fevereiro de 2024, às 09 horas, na sala F2-254 do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG, reuniu-se, em sessão fechada, a Comissão Examinadora composta pelos Professores Doutores: Aristóteles Góes Neto do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG (Orientador), Caroline Salvan Pagnan da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG e Maria Teresa Paulino Aguilhar do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG, para julgamento da Dissertação do Mestrado em Inovação Tecnológica - Área de Concentração: Gestão da Inovação, Propriedade Intelectual e Empreendedorismo, da discente Carla Queiroga Werkhaizer, Dissertação intitulada: **“Glucan: uso da inteligência fúngica e Biofabricação digital para o desenvolvimento de biopolímeros compostáveis e regenerativos.”** O Presidente da Banca abriu a sessão e apresentou a Comissão Examinadora, bem como esclareceu sobre os procedimentos que regem da defesa pública de dissertação. Após a exposição oral do trabalho pela discente, seguiu-se com arguição pelos membros da Banca Examinadora, com a respectiva defesa da candidata. Finda a arguição, a Banca Examinadora se reuniu, sem a presença da discente, tendo deliberado unanimemente pela sua **APROVAÇÃO**. Nada mais havendo para constar, lavrou-se e fez a leitura pública da presente Ata que segue assinada por mim e pelos membros da Comissão Examinadora e pela coordenação do PPGIT. Belo Horizonte, 16 de fevereiro de 2024.

Professor Doutor Aristóteles Góes Neto (Orientador)
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professora Doutora Caroline Salvan Pagnan
(Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG)



“GLUON: USO DA INTELIGÊNCIA FÚNGICA E BIOFABRICAÇÃO DIGITAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE BIOPOLÍMEROS COMPOSTÁVEIS E REGENERATIVOS.”

CARLA QUEIROGA WERKHAIZER Nº DE REGISTRO 2021729472.

Dissertação **Aprovada** pela Banca Examinadora constituída pelos Professores Doutores:

Professor Doutor Aristóteles Góes Neto (Orientador)
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professora Doutora Caroline Salvan Pagnan
(Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG)

Professora Doutora Maria Teresa Paulino Aguiar
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Allan Claudius Queiroz Barbosa
Coordenador do PPG em Inovação Tecnológica da UFMG

Belo Horizonte, 16 de fevereiro de 2024.



UFMG
UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS


Professora Doutora Maria Teresa Paulino Aguilar
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)


Professor Doutor Allan Claudius Queiroz Barbosa
Coordenador do PPG em Inovação Tecnológica da UFMG

*Para quem me ensinou a ver
a beleza aos olhos da Ciência,
meu pai.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Aristóteles Góes Neto, que acreditou no potencial da minha pesquisa e me ensinou a me manter firme diante de todos os desafios. Agradeço à Prof. Dra. Liza Felicori, que recebeu a pesquisa no laboratório IDEA REAL de braços abertos. Agradeço à equipe do laboratório IDEA REAL, por todo o apoio e paciência em todas as etapas.

Ao Frederico Mendes e a toda a sua equipe da Supervisão de Novos Materiais da Stellantis, pela abertura à inovação e sólida parceria.

À CAPES pela concessão da bolsa que me permitiu dedicação exclusiva aos estudos e à pesquisa.

À minha família, por ser puro amor, todos os dias.

Aos membros da banca, duas protagonistas que admiro muito, Profa. Dra. Caroline Salvan Pagnan e a Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar, pelo olhar criterioso e cuidadoso ao meu trabalho.

"What i cannot create, i do not
understand"
(FEYNMAN, 1988)

RESUMO

A partir do aprimoramento do pedido de patente BR 10 2020 0135686, esta pesquisa explora as possibilidades de desenvolvimento de um biopolímero originado pela mistura de resíduos agrícolas, industriais e fungos, com o objetivo de criar um material mercadologicamente potente para substituir polímeros derivados de petróleo nos mais variados setores da indústria. Por meio da formação de um grupo de pesquisa interdisciplinar denominado Gluon Bio, a trajetória de desenvolvimento percorre práticas de design com organismos vivos, tecnologias de fabricação digital aplicadas a prototipagem de produtos de origem biológica, microbiologia, biotecnologia e engenharia de materiais. Para assegurar que o desenvolvimento dessa pesquisa tenha desde o início conexão direta com o mercado, foi firmada uma parceria com uma multinacional do setor automobilístico para co-desenvolvimento de um produto mínimo viável. Este é o primeiro passo para o objetivo principal da Gluon Bio: ser a primeira biofábrica de polímeros a base de fungos do Brasil.

Palavras-chave: biofabricação; micocompósitos; biopolímeros.

ABSTRACT

Based on the improvement of patent request BR 10 2020 0135686, this research explores the possibilities of developing a biopolymer made from a mixture of agricultural and industrial wastes and fungi, with the aim of creating a marketable material to replace petroleum-based polymers in a wide range of industrial sectors. Through the formation of an interdisciplinary research group called Gluon Bio, the development path runs through design practices with living organisms, digital manufacturing technologies applied to the prototyping of products of biological origin, microbiology, biotechnology and materials engineering. To ensure that the development of this research has a direct connection with the market from the outset, a partnership has been signed with a multinational in the automotive sector to co-develop a minimum viable product. This is the first step towards Gluon Bio's main objective: to be the first fungus-based polymer biofactory in Brazil.

Keywords: biofabrication; mycocomposites; biopolymers.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 - Um contexto praticamente irreversível.	12
1.2 - Bioeconomia circular.	13
1.3 - A Quarta Revolução Industrial e uma nova era no consumo	14
1.4 - A visão interdisciplinar que gera a inovação	16
1.5 - O ponto de partida.	17
2. JUSTIFICATIVA	19
2.1 - O encontro entre o Design e a Biologia.	19
2.2 - O universo micológico e seu potencial na geração de biopolímeros	22
2.3 - Resíduos agroindustriais lignocelulósicos e seu potencial para o desenvolvimento de materiais de micélios.	26
2.4 - Aditivos minerais e sua importância no desempenho dos micomateriais	27
2.5 - Processo produtivo	29
2.6 - Propriedades e aplicações dos micomateriais	31
3 - REVISÃO DE LITERATURA	36
3.1 - Fabricação digital e micomateriais.	36
3.2 - Mercado.	42
3.3 - Propriedade Intelectual	45
3.4 - Legislação.	46
4. METODOLOGIA	48
4.1 - Ciclo de produção	49
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1. Testes de Caracterização.	53
5.2. Resultados	58
5.3. Otimização da produção.	59
5.4. Definição de protótipo piloto.	60
6. CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Um contexto praticamente irreversível

Em março de 2022, durante a Quinta Assembléia das Nações Unidas para o Meio Ambiente, todos os 193 países assinaram um acordo que pode alterar os rumos da economia mundial: acabar com a poluição causada pelo polímero a partir de 2024 (FLETCHER *et al*, 2023). O relatório da Assembléia indica os altos custos sociais e ambientais relacionados à poluição por polímeros: entre US\$ 300 a US\$ 600 bilhões por ano, sendo algumas estimativas em mais de US\$ 1,5 trilhão por ano (LANDRIGAN *et al*, 2023; FLETCHER *et al*, 2023).

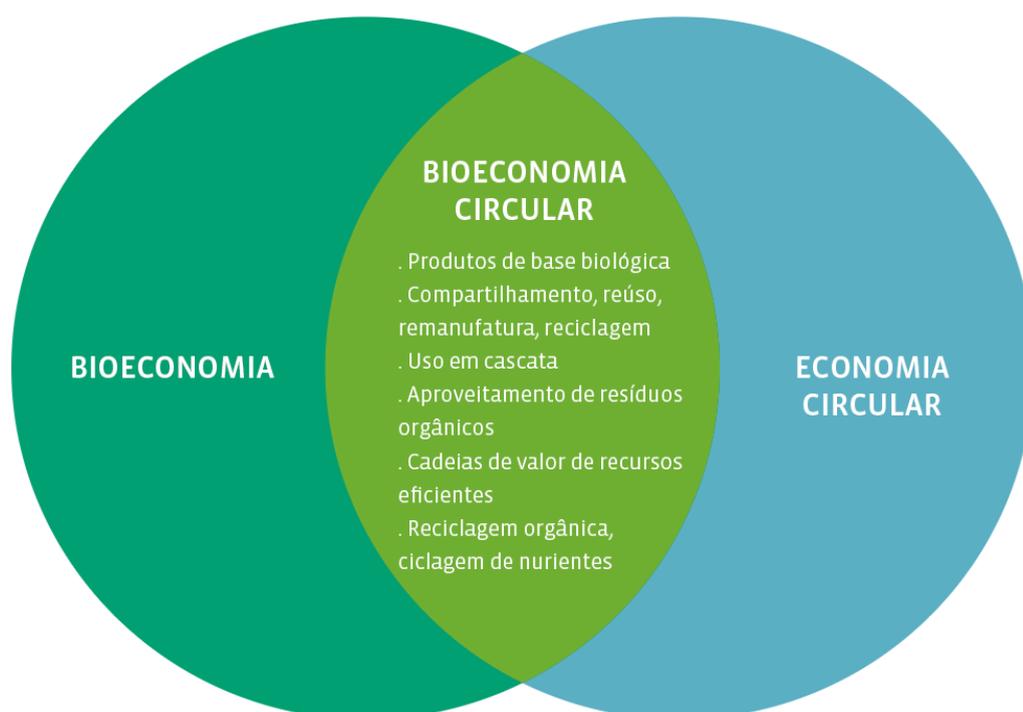
A poluição plástica já é encontrada em todos os tipos de solos, de todos os continentes do planeta. Nos oceanos, pesquisas identificam a presença do polímero no ecossistema marinho já há mais de 60 anos (MACLEOD *et al*, 2021; C. OSTIE *et al*, 2019). Estima-se que, desde 2016, apenas lagos, rios e oceanos recebem anualmente de 9 a 23 milhões de toneladas cúbicas de resíduos polímeros e uma quantidade aproximada foi depositada também em ambiente terrestre, com estimativas de que este montante duplique até 2025 (MACLEOD *et al*, 2021; BORELLE *et al*, 2020). Mesmo ações globais como a Convenção da Basileia que vetou o transporte de resíduos polímeros para países com sistemas deficitários em gestão de resíduos, e as políticas adotadas pela União Européia que possibilitam uma transição para a Economia Circular, ainda são esperados aumentos anuais na utilização de polímero. A poluição plástica pode causar impactos ambientais irreversíveis, como um desequilíbrio ambiental causado pela alteração dos ciclos de carbono e nutrientes no ecossistema. A presença de micropolímeros no ambiente marinho pode ainda afetar a entrega de nutrientes em águas profundas, causando um declínio indireto global nos oceanos. Em meio terrestre, um impacto irreversível é a mudança das propriedades do solo, como a capacidade de retenção de água que reduz consequentemente a atividade e diversidade microbiana, os nutrientes e a estrutura do solo, o que afeta o desempenho e a diversidade de plantas e resulta em um processo de degradação irreversível. (MACLEOD *et al*, 2021)

Existe uma solução economicamente viável: a transição para uma nova economia de polímeros é a maneira mais econômica de garantir que a poluição seja reduzida substancialmente até 2040, através de soluções que exigem vigilância,

determinação e criatividade (FLETCHER *et al*, 2023). Ações imediatas são necessárias para evitar que a poluição plástica não tenha seus limites excedidos e os impactos negativos no meio ambiente não sejam irreversíveis. Um dos caminhos em destaque é a redução drástica do consumo de polímeros virgens por meio de regulamentações precisas e uma coordenação internacional para o gerenciamento dos resíduos. Outro ponto crucial são ações de estímulo à inovação na criação de novos materiais que não sejam apenas sustentáveis, mas competitivos com os polímeros tradicionais (MACLEOD *et al*, 2021; C. OSTIE *et al*, 2019).

1.2 - Bioeconomia circular

Figura 1 - Diagrama de síntese da Bioeconomia Circular



Fonte: adaptado de ANGELIKI KYLILI *et al*, (2023)

Neste cenário de ações urgentes de reorganização da atividade econômica, as inovações tecnológicas desempenham um papel fundamental no reaproveitamento e na eficiência na utilização dos recursos já existentes. Segundo a OCDE a Biotecnologia, aplicada ao setor produtivo primário, à saúde e à indústria resultam na *Bioeconomia*, em que a Biotecnologia contribui para uma significativa parcela da economia. A organização prevê que a Bioeconomia em 2030 será

responsável pela evolução em três elementos: conhecimento avançado em genética e processamento celular, biomassa renovável e a integração dos demais setores da Biotecnologia (OCDE, 2009).

A Bioeconomia Circular representa a convergência dos princípios da bioeconomia e da economia circular, com o objetivo de aprimorar o desenvolvimento sustentável por meio do uso eficiente de recursos biológicos e da minimização de resíduos (NEWTON *et al*, 2017; (ANGELIKI KYLILI *et al*, 2023). A Comissão Europeia delineou a relação entre essas economias, enfatizando o uso de recursos biológicos renováveis e a retenção de valor em ecossistemas industriais interconectados. A bioeconomia se concentra na produção e na transformação de recursos renováveis em produtos valiosos enquanto que a economia circular busca ampliar o ciclo de vida dos materiais e garantir a capacidade de regeneração da natureza, contribuindo, em última análise, para a mitigação do clima por meio do sequestro de carbono nos ecossistemas florestais (ANGELIKI KYLILI *et al*, 2023). A Bioeconomia Circular também defende o aumento da resiliência do ecossistema e a garantia de sua importância na prevenção das mudanças climáticas e na conservação da biodiversidade. Produtos de base biológica cumprem as metas da bioeconomia circular, incluindo a proteção da biodiversidade e a ação climática. O objetivo da Bioeconomia Circular, não é, portanto, quantificar a Economia Circular, mas sim torná-la viável a longo prazo (SHARMA; MALAVIYA, 2023).

1.3 - A Quarta Revolução Industrial e uma nova era no consumo

A adoção de tecnologias digitais na indústria, que surge com a Indústria 4.0, desempenham um papel fundamental na transição para a Economia Circular, pois não apenas permitem o desenvolvimento de novos modelos de negócios sustentáveis e eficientes em termos de recursos, como facilitam a criação de novos modelos de produtos e serviços centrados no cliente (GYAN *et al*, 2023). Uma mudança global na forma de como produzimos e consumimos implica em uma rápida evolução dos sistemas de produção e, assim como a revolução trazida pelo computador pessoal e pela Internet na última década, as tecnologias de fabricação digital iniciaram uma transformação radical na indústria e, conseqüentemente, na produção e consumo globais (GERSHENFELD, 2012).

Segundo GERSHENFELD (2012):

"A revolução na manufatura não envolve métodos aditivos versus métodos subtrativos, mas sim a capacidade de converter dados em objetos físicos e vice-versa. Esse conceito de transformar dados em coisas e coisas em dados está no cerne da fabricação digital."

A manufatura aditiva desempenha um papel significativo nessa revolução, pois a versatilidade de processos que utilizam impressão 3D - desde a fusão térmica de filamentos de polímero à reticulação de resinas poliméricas com luz ultravioleta até a fusão de partículas de metal com feixe de laser - permite a aceleração dos processos de prototipação através da construção de diferentes componentes. É esta versatilidade da fabricação digital que leva as empresas a adotarem a impressão 3D para a prototipagem e modelagem rápida de produtos, permitindo criar formas complexas e um número ilimitado de novos protótipos antes da produção em escala (GERSHENFELD, 2012).

O processo de tomada de decisão por parte do designer durante o desenvolvimento de um produto pode determinar o impacto ambiental desse. Reduzir a utilização de determinada matéria prima no design, reciclar um material ou aumentar o ciclo de vida do produto por meio de reuso são decisões estratégicas, mas a utilização de materiais sustentáveis é considerada como ponto central no aprimoramento do desempenho ambiental do produto (CAMERE; KARANA, 2018). Em um movimento que potencializa a inovação no design, o material como ponto central no desenvolvimento de um produto aproximou designers dos cientistas de materiais nos últimos anos, o que Oxman classifica como um período de "criatividade orientada pelo material" (OXMAN, 2010; CAMERE, KARANA, 2018). Oxman propõe a "computação de projeto baseada em material", em que o processo de design é composto pela forma, estrutura e material. Envolve a incorporação de estratégias físicas de busca de formas com análise e fabricação digitais, nas quais a estruturação das propriedades do material com base no desempenho estrutural e ambiental gera a forma do projeto. Por meio dessa abordagem, é possível obter um alto grau de personalização do objeto, superando as limitações dos métodos tradicionais de design e promovendo práticas de design sustentáveis. Neste contexto, surgiu a aplicação dessas tecnologias à fabricação de materiais biológicos, customizando formatos e padrões (OXMAN, 2007).

1.4 - A visão interdisciplinar que gera a inovação

A sinergia entre Biotecnologia e Biofabricação está gerando novas oportunidades de inovação em materiais. Originalmente focada em produtos biomédicos, a Biofabricação é um processo que utiliza células e organismos vivos para produzir materiais e artefatos (MIRONOV *et al*, 2009; PAVLOVICH *et al*, 2016; FUJI *et al*, 2016; CAMERE e KARANA, 2018). Essa tecnologia vem se destacando no desenvolvimento de materiais sustentáveis devido ao seu baixo impacto ambiental. Diferente de métodos tradicionais, ela dispensa a extração de matéria-prima virgem da natureza e emprega fontes renováveis como nutrientes para os organismos (HOLT *et al*, 2012; LELIVELT *et al*, 2015; CAMERE e KARANA, 2018). Como resultado, os materiais biofabricados são não apenas inofensivos ao meio ambiente, mas também biodegradáveis, podendo até mesmo enriquecer o solo ao final de seu ciclo de vida (McDONOUGH e BRAUNGART, 2010; CAMERE e KARANA, 2018).

Diante desse potencial, designers estão assumindo um papel cada vez mais relevante no desenvolvimento de novos materiais. Por meio do *Growing Design* — metodologia emergente que integra artesanato, design e biologia —, eles exploram as propriedades de materiais cultivados a partir de organismos vivos para criar formas, funções e soluções inovadoras no campo do design sustentável. Essa abordagem está redefinindo o processo criativo: designers agora participam ativamente da fase inicial de desenvolvimento de produtos, etapa antes dominada exclusivamente por biólogos, químicos e cientistas de materiais (MIODOWNIK, 2007; KARANA *et al*, 2018). Envolvidos em etapas como testes de caracterização de materiais com protótipos em etapa inicial, designers atuam na interseção entre as diferentes disciplinas ao colaborar com vários especialistas em diversas áreas e integrando as contribuições, por meio de uma metodologia de pesquisa interdisciplinar (SAKAO and BRAMBILA-MACIAS, 2018; WILKES *et al*, 2016; CAMERE, KARANA, 2018). Através destas colaborações em diferentes áreas e etapas de desenvolvimento, o papel do designer muda radicalmente de receptor de um material pronto para desenvolvedor ativo do material, assumindo total controle sobre o ciclo produtivo (KARANA *et al*, 2015; CAMERE, KARANA, 2018). A maior

parte dos projetos em *Growing Design* utiliza organismos vivos (MONTALTI *et al*, 2017; CAMERE, KARANA, 2018).

O reino Fungi está presente em todos os biomas do planeta e compõem um sistema altamente complexo e diversificado de microrganismos (SIERRA *et al*, 2023). Micélios fúngicos são o corpo dos fungos, e é formada por uma rede complexa entrelaçada composta por uma rede de células tubulares cilíndricas microscópicas chamadas hifas. Os fungos saprotróficos desempenham um papel crucial como decompositores de matéria orgânica morta (ATTIAS *et al*, 2020).

Diante da versatilidade e alto potencial biotecnológico, micélios fúngicos têm ganhado aplicação na indústria de biomateriais. Materiais a base de micélios aproveitam as propriedades naturais das redes fúngicas, oferecendo alternativas sustentáveis e auto regenerativas aos produtos petroquímicos. Essa mudança está impulsionando os avanços científicos, conforme evidenciado pelo aumento da produção de estudos, aprimorando os biomateriais existentes e gerando novas aplicações (SIERRA *et al*, 2023). Vantagens como a utilização de fontes renováveis, biodegradabilidade, baixo consumo energético durante o ciclo produtivo e potencial de rentabilidade são fatores essenciais para a implementação de um ciclo produtivo baseado na Economia Circular e em políticas públicas para a sustentabilidade, o que justifica o interesse crescente nesses micomateriais pela indústria de biomateriais (MACARTHUR, WAUGHROY & STUCHTEY, 2006; JIANG *et al*, 2016; GIROMETTA *et al*, 2019 ; APPELS *et al*, 2020; APPELS & WÖSTEN, 2021; SIERRA *et al*, 2023).

1.5 - O ponto de partida

O objeto de pesquisa desta dissertação tem como ponto de partida os biomateriais de micélios fúngicos descritos na patente BR 102020013568-6. A patente discute o desenvolvimento de micocompósitos com propriedades mecânicas diferenciadas, com foco em seu processo de produção, usando resíduos agrícolas e aditivos minerais, bem como sua aplicação em materiais estruturais como isolantes térmicos e acústicos. O protocolo proposto envolve a criação de uma matriz para o crescimento de fungos, que gera o desenvolvimento de micocompósitos ao reaproveitar resíduos de mineração e minerais de baixo valor econômico, bem como subprodutos agrícolas vegetais. A patente avaliou o efeito do uso de resíduos de sisal (tanto do processo de desfibração do sisal quanto da industrialização da fibra) e

resíduos de dendê no crescimento dos fungos *Ganodermataceae*. Para os aditivos, foram testados resíduos do processamento do sisal, como a poeira das máquinas de bater, e resíduos de dendê; os quais foram utilizados isoladamente ou misturados, formando uma massa. Esses resíduos agrícolas servem como nutrientes orgânicos e podem ser suplementados com pelo menos um dos aditivos de origem mineral citados nas reivindicações da patente. Os substratos usados para o crescimento de fungos podem induzir alterações fisiológicas e bioquímicas específicas, influenciando a densidade da biomassa celular, o que se refere às características mecânicas dos micocompósitos desenvolvidos. O uso desses resíduos é particularmente relevante no contexto brasileiro em que uma porcentagem significativa de resíduos lignocelulósicos como restos da extração de dendê e resíduos sólidos resultantes da desfibrilação do sisal são subutilizados. A integração desses subprodutos agrícolas na produção de micocompósitos não apenas promove a valorização dos resíduos, como também contribui para a sustentabilidade e a compatibilidade ambiental das indústrias automotiva e de construção nas quais esses materiais são cada vez mais procurados por suas promissoras propriedades de absorção acústica e outros atributos mecânicos (SIERRA *et al*, 2023).

O tema desta dissertação teve sua origem em 2018. Como gerente de um laboratório acadêmico de fabricação digital em Belo Horizonte, me deparei com os efeitos nocivos do uso excessivo de polímeros como matéria prima em equipamentos de manufatura aditiva como impressoras 3D e tecnologias de corte como cortadoras de vinil e fresadoras CNC. Desde o acúmulo de resíduos de filamento polímero derretido gerado pela impressão 3D até as sobras de chapas de materiais polímeros utilizados na fresadora e adesivos na cortadora de vinil, o excedente produtivo do laboratório era composto em sua maioria por polímeros derivados da extração de petróleo. Ao perceber que o ciclo produtivo do laboratório não estava de acordo com os princípios da Economia Circular, que permeiam o ecossistema de inovação, iniciei uma pesquisa por conta própria acerca da produção de materiais sustentáveis para utilização em fabricação digital e cheguei à Biofabricação e ao *Growing Design* para a produção de compósitos de micélio fúngico. Diante do enorme potencial biotecnológico dos micélios, a pesquisa que começou de forma independente em um laboratório acadêmico de fabricação digital é a origem do produto tecnológico exposto nesta dissertação.

Em abril de 2022 foi firmado um Termo de Confidencialidade entre a Coordenadoria de Transferência e Inovação Tecnológica - CTIT - da Universidade Federal de Minas Gerais e Supervisão de Novos Materiais da Stellantis para a América Latina, que viabiliza a execução de testes de caracterização dos micomateriais produzidos pelo grupo de pesquisa nos laboratórios de Novos Materiais da multinacional. O objetivo da parceria é viabilizar os testes de caracterização utilizando as mesmas tecnologias e as mesmas normas empregadas para testes de materiais convencionais. Espera-se, como produto final, que as propriedades dos micomateriais detectadas nos testes revelem potenciais vantagens para o desenvolvimento de biopolímeros que substituam os materiais convencionais presentes atualmente na linha de produção da montadora.

2. JUSTIFICATIVA

2.1 - O encontro entre o Design e a Biologia

Os avanços na fabricação de biomateriais de micélios são resultado da colaboração interdisciplinar entre micólogos e biotecnólogos com designers, artesãos, cientistas de materiais e arquitetos, que convergem conhecimento e metodologias de diferentes disciplinas para gerar produtos disruptivos e conectados às demandas do mercado. Diante deste contexto, duas práticas são frequentemente adotadas para o desenvolvimento de materiais a partir de organismos vivos: a Biofabricação digital e o *Growing Design*.

Na Biofabricação Digital, designers aplicam tecnologias de fabricação digital para o desenvolvimento de organismos vivos (CAMERE, KARANA, 2017). Neste caso, as tecnologias de fabricação digital são empregadas para simular sistemas biológicos. A Biofabricação Digital amplia as possibilidades do design, ao combinar tecnologias como manufatura aditiva, tecnologias digitais e modelos matemáticos, os projetos de Biofabricação somam possibilidades de inspiração das novas tecnologias à Natureza que, simulada pelas tecnologias digitais, dá origem à uma nova "ecologia dos materiais" (OXMAN, 2015; CAMERE, KARANA, 2017). Nesta prática, as tecnologias de fabricação digital não são utilizadas apenas para produzir,

mas para redirecionar o comportamento dos organismos; e é este ponto que a diferencia do Growing Design, cujo foco está no processo de experimentação, artesanal e autoral (CAMERE, KARANA, 2017).

O termo *Growing Design* aparece pela primeira vez em 2010, no projeto Officina Corpuscoli de Maurizio Montalti (<https://www.corpuscoli.com/projects/the-growing-lab/>). Segundo o autor, a prática tem origem nos princípios da Economia Circular e utiliza resíduos de outros processos industriais como a agricultura ou a manufatura, que são reutilizados a partir de técnicas que utilizam micélios fúngicos como matéria prima (ex: fermentação). Como produto, são criadas diversas matrizes originadas pela combinação destes dois processos, pois resíduos agrícolas (como palha de trigo, palha de colza, algodão, cânhamo, miscanthus, dentre outros) são colonizados por micélio fúngico selecionado, que utiliza o resíduo como nutriente ao digeri-lo parcialmente, o que dá origem a uma estrutura de micélios entrelaçados que acabam por atuar como reforço estrutural à matriz. O resultado disso são materiais compostos 100% naturais e artefatos com propriedades que permitem uma enorme versatilidade de aplicações em design.

Dentre as etapas principais neste ciclo produtivo está o processamento e limpeza da matéria prima. É necessário que os substratos orgânicos sejam embalados em sacos específicos que permitem que o fungo respire adequadamente durante seu crescimento. Fatores como a composição do resíduo agrícola, a linhagem do fungo e o protocolo implementado podem gerar outros processos nesta etapa como a pasteurização ou a esterilização para a completa eliminação de micro-organismos potencialmente competidores destes compostos nutritivos, o que permite a colonização de forma constante e completa da matriz. Após a inoculação dos substratos selecionados, os sacos são transferidos para incubadoras com parâmetros (temperatura, umidade, etc) controlados para garantir um crescimento estável. Nesta fase o fungo digere e transforma as fibras, atuando como um reforço na matriz e dando origem a um composto material totalmente livre de polímero. Os ajustes dos parâmetros das condições ambientais podem resultar em diferentes tipologias de materiais, com diferentes propriedades, em um curto período de tempo e com um uso limitado de recursos. Após a colonização completa do substrato, o material vivo é inserido em moldes para dar forma aos artefatos e produtos. Após o crescimento total, os artefatos resultantes são retirados dos moldes e passam por

um processo de secagem lenta, com baixo consumo de energia. O resultado são produtos inertes, estáveis, seguros, duráveis e biodegradáveis. No final da sua vida útil estes produtos podem ser jogados em um jardim ou no solo, quando se transformarão em nutrientes para o crescimento de novos seres vivos (MONTALTI, 2010).

O *Growing Design* (MONTALTI, 2010; CIUFFI, 2013; KARANA, CAMERE, 2017), portanto, tem como característica principal a prática mão-na-massa, com o objetivo de desenvolver novos materiais para o design de produtos. O objetivo do projeto é na maior parte das vezes de caráter realista, aplicado para o desenvolvimento de produtos para o mercado em curto prazo. Designers que "crescem materiais" não buscam soluções na biologia sintética e não utilizam organismos biologicamente alterados. Rognoli classifica o *Growing Design* como uma "prática material D-I-Y (*Do it Yourself*)" ou "*Faça você mesmo*", em que os materiais são projetados por meio de técnicas de invenção desenvolvidas pelos próprios designers. Dentro dessa visão, é possível identificar os atributos que tornam o *Growing Design* tão atraente para os designers: a oportunidade de uma estética nova que contrasta com os modelos de perfeição da indústria tradicional e a autonomia dos designers em desenvolver o seu próprio processo de produção, o que traz para o designer o controle total do ciclo produtivo, do desenvolvimento até a inserção do produto no mercado (ROGNOLI et al, 2015; CAMERE, KARANA, 2017).

São projetos precursores do *Growing Design*: o *Growing Lab* (<https://www.corpuscoli.com/projects/the-growing-lab/>) de Maurizio Montalti, que inicia as possibilidades de desenvolver produtos com design a partir de resíduos agrícolas inoculados com micelios de fungos; Gavin Munro e suas cadeiras moldadas a partir do direcionamento natural dos galhos das árvores (<https://luxiders.com/grow-your-own-chair-gavin-munros-truly-natural-furniture/>); Suzanne Lee e seu movimento precursor na moda com as primeiras peças de roupas feitas com celulose bacteriana (<https://www.dezeen.com/2014/02/12/movie-biocouture-microbes-clothing-wearable-futures/>); Neri Oxman e seu pavilhão construído em seda por meio do cultivo monitorado das larvas do inseto no local da exposição (<https://oxman.com/projects/silk-pavilion-i>); e a cadeira de Eric Klarenbeek feita em impressão 3D a partir de biopolímero de micélios puros (<https://www.dezeen.com/2013/10/20/mycelium-chair-by-eric-klarenbeek-is-3d-printe>

[d-with-living-fungus/](#)). A designer Julie Beeler catalogou 825 espécies de fungos e suas possibilidades de utilização como pigmentos têxteis, no mapa interativo Mushroom Color Atlas (<https://www.mushroomcoloratlas.com/>).

A maior parte dos projetos que podem ser classificados como *Growing Design* partem de três grupos de organismos biológicos: fungos (especificamente, micélios), bactérias e algas. O processo de desenvolvimento de biomateriais a partir destes grupos possui algumas práticas similares: em todos os casos são necessários procedimentos de esterilização antes do preparo para o crescimento. Para o processo de desenvolvimento do organismo são adicionados nutrientes, quando também é necessário um período de tempo de algumas semanas em repouso para o crescimento. Na etapa final pós-desenvolvimento, o crescimento do organismo é interrompido por meio de secagem. (KARANA *et al*, 2018) . Estas etapas, em comum para todos os processos de biofabricação, proporcionam diferentes possibilidades de intervenção para os designers, resultando em várias possibilidades de variação de propriedades e características dos biomateriais (KOLLER *et al*, 2012,; HANNON *et al*; 2010, KARANA *et al*, 2018).

2.2 - O universo micológico e seu potencial na geração de biopolímeros

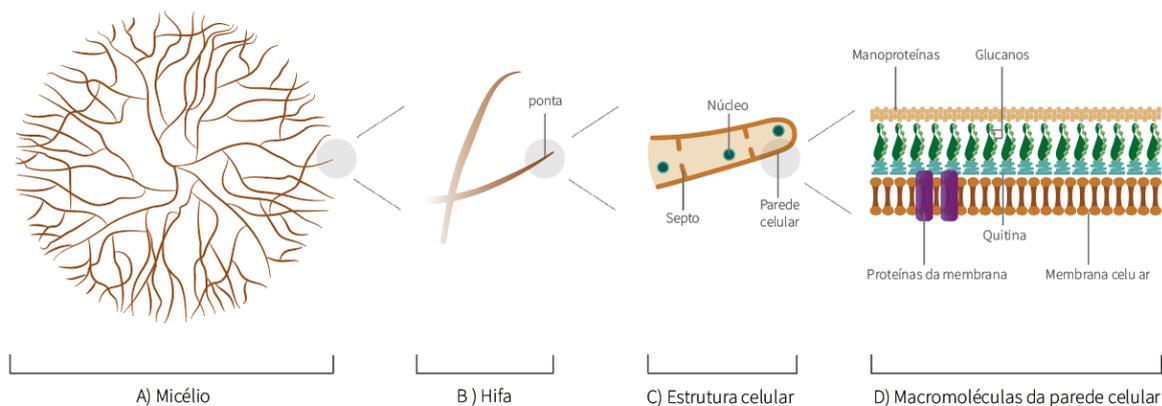
Estima-se que o Reino Fungi compreenda entre 2,2 e 3,8 milhões de espécies, entre cogumelos, fungos, bolores, leveduras e líquens. Dentre as quais, menos de 10% foram descritas (WILLIS, 2018; DESHMUKH, DESHPANDE, SRIDHAR, 2022), o que leva a concluir que se trata de um recurso natural com potencial praticamente inexplorado. O Reino Fungi desempenha um papel fundamental para o equilíbrio da biodiversidade do planeta. Graças às propriedades naturais de reciclar carbono, e outros nutrientes para o solo, fungos são utilizados para funções como micofiltração, micofloresta, micorremediação e micopesticidas. Sua enorme diversidade em morfologia, propriedades naturais e aplicações biotecnológicas existentes já abrem caminho para um crescimento exponencial de aplicação deste recurso natural nos mais diversos setores (DESHMUKH, DESHPANDE, SRIDHAR, 2022).

Os fungos, principalmente dos filos *Basidiomycota* e *Ascomycota*, são cruciais na decomposição da matéria orgânica, desempenhando, portanto, um papel vital no ciclo do carbono e na distribuição de nutrientes nos ecossistemas (MOSQUERA,

2007; BLACKWELL, 2011; BADOTTI *et al*, 2017; TEDERSOO *et al*, 2018, SIERRA *et al*, 2023). Eles decompõem a biomassa vegetal, devolvendo carbono e outros nutrientes ao solo e à atmosfera, mantendo assim o equilíbrio ecológico. Os fungos destes dois filos são capazes de produzir enzimas que degradam polímeros vegetais complexos como celulose, hemicelulose e lignina em moléculas mais simples (GAUTAM *et al*; 2019, SIERRA *et al*, 2023). A maioria dos fungos precisa de um ambiente aeróbico com água, uma fonte de carbono e energia e nitrogênio, fósforo, enxofre, magnésio, potássio e cálcio, em diferentes proporções, para crescer (MONEY, 2016; SIERRA *et al*, 2023). Graças a essa propriedade, os fungos Ascomycota e Basidiomycota são utilizados para várias aplicações industriais, inclusive a produção de biomateriais. Dentro dos Basidiomycota, os fungos ainda são classificados com base em seus mecanismos de decomposição da madeira. Os fungos da podridão branca são capazes de decompor os três principais componentes da madeira - celulose, hemicelulose e lignina enquanto que os fungos da podridão parda decompõem principalmente a celulose e a hemicelulose, mas apenas modificam a lignina sem degradá-la. Essa distinção é importante para entender seus papéis nos ecossistemas e suas aplicações potenciais nas indústrias de biotecnologia e biomateriais (GUPTA *et al*, 2019; SIERRA *et al*, 2023).

Em relação à morfologia, os fungos podem ser unicelulares ou pluricelulares (hifas). Na fase hifal, as células são alongadas e cilíndricas e se estendem a partir das extremidades (crescimento apical). O micélio, ou o conjunto de hifas, é o corpo do fungo, que pode se apresentar longo ou ramificado, dependendo da interação das hifas com o ambiente e da espécie (LOGUERCIO-LEITE, 2004; GIROMETTA *et al*, 2019; SIERRA *et al*, 2023). Essas características dos micélios podem definir propriedades como resistência e coesão com o substrato do micomaterial no produto final. A parede celular das hifas fúngicas, formada por glucanos, quitina e proteínas, está relacionada a características como rigidez e forma, pois é responsável pela interação com outros organismos e materiais (FREE, 2013; SIERRA *et al*, 2023).

Figura 2 - Composição morfológica dos fungos



Fonte: gráfico do autor (2023)

Basidiomycota é o filo mais utilizado na produção de micomateriais, devido aos mecanismos enzimáticos e não-enzimáticos que degradam biomassa lignocelulósica (PELLETIER *et al*, 2013; GIROMETTA *et al*, 2019; SIERRA *et al*, 2023).

Os fungos basidiomicetos mais utilizados para a produção de Micomateriais fazem parte dos gêneros *Pleurotus*, *Trametes* e *Ganoderma*, por apresentarem maiores taxas de velocidade e eficiência de crescimento. Dentre os *Pleurotus*, a espécie *Pleurotus ostreatus* é a mais utilizada. *Pleurotus albidus*, *Pleurotus sanguineus*, *Pleurotus pulmonarius*, *Pleurotus salmoneostramineus* e *Pleurotus eryngii* são também utilizadas na produção de micocompósitos. Entre os *Trametes*, *Trametes versicolor* é muito utilizado. O *Ganoderma lucidum* e o *Ganoderma applanatum* são também espécies frequentemente utilizadas na produção de micocompósitos, devido à sua abundância na natureza, ao potencial enzimático na digestão da lignina e à diversidade de resíduos lignocelulósicos que podem ser utilizados como substratos (DESHMUKH; DESHPANDE; SRIDHAR, 2022).

O termo micocompósitos, citado primeiramente por Jiang *et al* (2016), é o termo utilizado no presente trabalho para se referir a compósitos feitos a partir de fungos, o qual é composto por duas etapas: a) a fase da matriz, composta por resíduo agroindustrial lignocelulósico, fonte de carbono para o crescimento do micélio, e aditivos minerais; b) fase de agregação, constituída pelo micélio (MEYERS *et al*, 2008 ARIFIN & YUSUF, 2013; PELLETIER *et al*, 2013; LELIVELT

et al, 2015; JIANG *et al*, 2016; YANG *et al*, 2017; GIROMETTA *et al*, 2019; HYDE *et al*, 2019, SIERRA *et al*, 2023).

Micomateriais podem ser classificados em dois tipos principais: puros e compostos. Os puros são formados exclusivamente por micélios, como couro de micélios, filmes e microfilamentos fúngicos (nanopapers e nanofibras). Já os micomateriais compostos são conhecidos como micocompósitos, sendo uma mistura de substrato (mistura de nutrientes sobre a qual o micélio se desenvolve) e micélios. Já os híbridos de micélios são constituídos por elementos fúngicos e outros materiais.

Figura 3 - Tipos de materiais de fungos



Fonte: gráfico do autor (2023)

Fatores como as características da espécie, do tipo de substrato e do sistema de produção conferem versatilidade aos micomateriais. Tais características são aprimoradas para adequar o desempenho do material a sua aplicação, tornando-os biodegradáveis, rígidos ou flexíveis, absorventes ou resistentes à água. (HOLT *et al*, 2012; ARIFIN & YUSUF, 2013; PELLETIER *et al*, 2013, 2017; LELIVELT *et al*, 2015; HANEEF *et al*, 2017; SIERRA *et al*, 2023).

2.3 - Resíduos agroindustriais lignocelulósicos e seu potencial para o desenvolvimento de materiais de micélios

O desenvolvimento agrícola responde por $\frac{1}{3}$ do PIB mundial, com um volume de produção na ordem de 7,26 Gt, sendo o volume de resíduos secos de biomassa vegetal o equivalente a 140 Gt (BANCO MUNDIAL, 2020, VAZ JUNIOR, 2020). Por meio de estratégias e tecnologias para o aproveitamento como matéria prima sustentável, a biomassa agrícola é atualmente aplicada na produção de novos produtos para diversos setores sob a óptica da Bioeconomia, como biocombustíveis, bioenergia, biopolímeros, biomateriais, produtos químicos, farmacêuticos, cosméticos e produtos de higiene, agroquímicos e fertilizantes.

O uso de diferentes tipos de biomassa vegetal tem se consolidado como alternativa para a produção de matérias-primas sustentáveis, tornando-se de grande interesse econômico, especialmente os quatro tipos a seguir: oleaginosas, sacarídeas, amiláceas e lignocelulósicas. Destas, a biomassa lignocelulósica é a mais abundante - por ser formada por celulose, hemicelulose e lignina - os três componentes da parede celular e da estrutura morfológica das plantas.

Os resíduos agroindustriais são formados em sua maior parte por plantas lignocelulósicas, pois todas as plantas são compostas por lignina, celulose e hemicelulose. A tabela a seguir compara a composição química da biomassa vegetal em algumas das plantas mais comuns cultivadas no Brasil:

(adaptado de VASSILEV *et al*, 2012; VAZ JUNIOR, 2020)

Tabela 1 - Composição química, em % m/m, de biomassas lignocelulósicas

Biomassa	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Palha de cevada	48,6	29,7	21,7
Sabugo de milho	48,1	37,2	14,7
Gramas	34,2	44,7	21,1
Bagaço de cana-de açúcar	42,7	33,1	24,2
Casca de arroz	43,8	31,6	24,6
Palha de trigo	44,5	33,2	22,3
Madeira de eucalipto	52,7	15,4	31,9

Fonte: adaptado de VAZ JUNIOR (2020)

Resíduos agroindustriais lignocelulósicos são utilizados como nutriente ou substrato para a colonização de fungos filamentosos na produção de micomateriais. Os micélios se desenvolvem entre estas fibras e fragmentos da madeira. Ao secretar

enzimas como lacases e peroxidases para decompor a biomassa vegetal lignificada, o fungo obtém os nutrientes e degrada a lignocelulose. Durante esse processo ocorre a oxidação enzimática que altera a estrutura química da lignina, o que gradativamente une o substrato, formando um material com propriedades adesivas (ELSACKER, 2021). As características do meio nutritivo influenciam as propriedades morfológicas da espécie utilizada (HANEED *et al*, 2017; ELSACKER, 2021). As propriedades mecânicas das fibras naturais utilizadas para o crescimento de materiais de micélios, devido a fatores como método de processamento, condições ambientais durante o crescimento e composição lignocelulósica, consequentemente influencia as propriedades do micocompósito. Outros fatores fundamentais na seleção das fibras para o desenvolvimento de materiais de micélios são a dimensão, possíveis falhas e deformações, força e estrutura (FARUK *et al*, 2012; ELSACKER, 2021). Substratos que contém muitas fibras naturais que não sofrem degradação micelial possuem maior rigidez, pois as fibras naturais reforçam o material e previnem rupturas (YANG *et al*, 2017; ELSACKER, 2021).

2.4 - Aditivos minerais e sua importância no desempenho dos micomateriais

Aditivos desempenham um papel crucial na saúde fúngica e consequentemente nas propriedades do micomaterial final. No processo de produção de biomateriais de micélios, os aditivos são substâncias introduzidas no substrato que fornecem nutrientes essenciais para o desenvolvimento ideal do tecido micelial. Estes podem incluir macronutrientes como fósforo, nitrogênio e potássio, que são necessários em grandes quantidades, bem como ferro, manganês e zinco; micronutrientes necessários em pequenas quantidades mas essenciais no metabolismo fúngico. A ausência desses limita o crescimento e o desenvolvimento dos micélios. O uso de aditivos aumenta consideravelmente a colonização do substrato por micélios, pois eles formam uma rede mais robusta e mais densa quando encontram nutrientes amplamente disponíveis. Esta característica confere aos aditivos uma função importante na estrutura física e nas propriedades do micélio, principalmente para o desenvolvimento de biomateriais (DONINI *et al*, 2006, SÁNCHEZ, 2010, SIERRA *et al*, 2023).

A tabela a seguir reúne os suplementos mais utilizados em micomateriais:

Tabela 2 - Principais espécies utilizadas na fabricação de micomateriais, aditivos utilizados e seus efeitos no crescimento e propriedades do material final.

Espécie	Aditivo	Função do aditivo	Efeitos do aditivo	Referência
<i>Ganoderma lucidum</i>	oligossacarídeos com base em quitina e β -glucano	suplemento nutricional e suporte ao crescimento	aumentar a resistência da ligação interna, o ponto de ruptura e de elasticidade	Liu <i>et al</i> (2019)
	farinha de milho, KH_2PO_4 , K_2HPO_4 , MgSO_4 , e glicose	suplemento nutricional	melhora o crescimento e corrige o pH	
<i>T. flavus</i>	lizardita	suporte ao crescimento	aumenta a resistência da ligação interna	Li <i>et al</i> (2022)
<i>G. lucidum</i>	d-glucose, lignina alcalina	suporte ao crescimento	aumenta a resistência da ligação interna	Antinori <i>et al</i> (2020)
<i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>P. citrinopileatus</i> , <i>P. eryngii</i> , and <i>G. lucidum</i>	farinha, casca de psyllium integral, e penas de frango	suplemento nutricional e suporte ao crescimento	melhora o crescimento, aumentar a resistência da ligação interna	Silverman <i>et al</i> (2020)
<i>Trichoderma asperellum</i> , <i>Agaricus bisporus</i> , <i>G. lucidum</i> , <i>P. ostreatus</i>	casca de aveia, bagaço de canola, serragem de pinheiro moída, palha de aveia, serragem de madeira de bétula	suplemento nutricional e suporte ao crescimento	melhora o crescimento, aumentar a resistência da ligação interna	Tacer-Caba <i>et al</i> (2020)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	polipropileno	suporte ao crescimento	aumenta a resistência à tração	Räut <i>et al</i> (2021)
<i>P. ostreatus</i> , <i>Oudemansiella radicata</i> , <i>Acremonium sp.</i>	CaCO_3	suporte ao crescimento	aumenta a resistência à tração	Gou <i>et al</i> (2021)
<i>P. ostreatus</i>	látex	desaceleração da taxa de crescimento, suporte ao crescimento	crescimento tardio de fungos e resistência	He <i>et al</i> (2014)

Espécie	Aditivo	Função do aditivo	Efeitos do aditivo	Referência
<i>G. lucidum</i> , <i>P. ostreatus</i>	argila (65.50% SiO ₂ , 1.10% TiO ₂ , 21.50% Al ₂ O ₃ , 8.9% Fe ₂ O ₃ , 0.30% CaO, 0.80% MgO, 1.80% K ₂ O, 0.10% Na ₂ O, 0.4% Mn)	suporte ao crescimento	aumenta a resistência	Jauk <i>et al</i> (2022)
não especificado	celulose bacteriana	suporte ao crescimento	sem conclusões	Hoenerloth <i>et al</i> (2022)
<i>T. versicolor</i>	nanofibras de celulose	suporte ao crescimento	aumenta a resistência	Sun <i>et al</i> (2019)
<i>T. versicolor</i>	celulose bacteriana	suporte ao crescimento	reforço da ligação interna	Elsacker <i>et al</i> (2021)
<i>G. lucidum</i>	caroços e cascas de sementes de algodão	suporte ao crescimento	reforço da ligação interna	Holt <i>et al</i> (2012)
<i>Triticum sp.</i> , <i>Pleurotus sp</i>	carragenina, quitosano e goma xantana	suporte ao crescimento	aumento das propriedades mecânicas	Lópes Nava <i>et al</i> (2015)
não especificado	carboidratos e minerais (não especificado)	suplemento nutricional	melhora o crescimento	Tudryn <i>et al</i> (2018)
<i>Mortierella alpina</i> , <i>Mucor circinelloides</i>	Ácidos graxos poliinsaturados, glucano, proteínas, quitina e outros polímeros naturais	suplemento nutricional e suporte ao crescimento	melhora o crescimento, fortalece as ligações internas	Meyer <i>et al</i> (2020)
<i>Lentinula edodes</i>	farelo de trigo	suplemento nutricional	suplemento nutricional	Matos <i>et al</i> (2019)

Fonte: adaptado de SIERRA et al (2023).

2.5 - Processo produtivo

O crescente interesse em materiais de micélios é justificado pelo aproveitamento de fontes renováveis, biodegradabilidade, baixo consumo energético, potencial mercadológico competitivo frente a outros materiais de origem

petroquímica, impacto ambiental positivo e ciclo produtivo com baixa emissão de poluentes, as quais são vantagens que inserem esse novo material nas premissas defendidas pela Economia Circular.

A maioria dos métodos de produção de micocompósitos segue os protocolos de colonização do substrato, que é inserido em molde para o crescimento micelial. Após o desenvolvimento micelial atingir o estágio desejado, o micocompósito é retirado do molde, prensado e seco (GIROMETTA *et al*, 2019). Os parâmetros de pressão e temperatura são variáveis de acordo com a espécie, tipo de substrato e propriedades desejadas no micomaterial, conforme gráfico abaixo:

Figura 4 - (A) Fatores básicos para o desenvolvimento industrial de micocompósitos. (B) Variáveis que influenciam as propriedades mecânicas do produto final, de acordo com a etapa de produção.



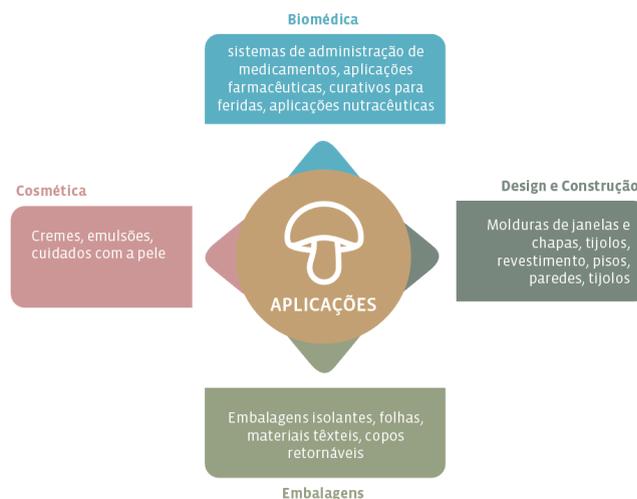
Fonte: gráficos do autor, adaptado de GIROMETTA *et al* (2019)

2.6 - Propriedades e aplicações dos micomateriais

Estes biomateriais fúngicos são originados pela interrupção do desenvolvimento das hifas em um meio nutriente inserido em um molde. O resultado final é um material com vantagens como leveza, baixo custo, resistência, biodegradabilidade e atoxicidade naturais, o que posiciona estes materiais de origem biológica feitos com micélios uma alternativa altamente promissora como substituto ao poliestireno e outros polímeros de origem fóssil e, portanto, adequados para utilização em embalagens ou como isolante térmico. Na sua forma pura ou composta, as propriedades dos micomateriais dependem de fatores como tipo de substrato, espécie, condições de crescimento e pós-produção. Técnicas como a utilização de prensagem aquecida, por exemplo, torna o micomaterial mais homogêneo, resistente e rígido, alterando suas características de similar a espuma para algo próximo a um compensado de madeira. Materiais de micélios puros feitos a partir de micélios da espécie *Schizophyllum commune*, por exemplo, apresentam enorme potencial para a utilização como substitutivo ao couro, devido ao seu aspecto similar ao produto natural. A mesma espécie, ao ser alterada geneticamente, pode apresentar um aspecto similar aos termopolímeros (APPELS *et al*, 2019; MEYER *et al*, 2020).

Propriedades como capacidade de absorver ou dissipar impactos - desde ondas sonoras até abalos sísmicos - ser anti-combustão, isolante acústico e térmico fazem dos micocompósitos uma excelente alternativa também no setor de Construção. Um estudo comprovou que compósitos de micélios feitos com substratos agroindustriais têm um potencial de absorção sonora de 70 a 75% (SAMSUDIN *et al*, 2016 MEYER *et al*, 2020). As características físicas e químicas similares às espumas são adequadas para sua aplicação em materiais não-estruturais, como portas e painéis termoacústicos. Devido à baixa densidade e baixo índice de condutibilidade energética, o compósito de micélios prensado pode ser utilizado em pisos, painéis, revestimentos e decoração (JIANG *et al*, 2019, MEYER *et al*, 2020).

Figura 5 - Aplicações de materiais a base de fungos



Fonte: adaptado de ALANEME *et al* (2023)

As propriedades do micomaterial podem ser reguladas para atender a esta diversidade de aplicações, como mostra a tabela a seguir:

Tabela 3 - Comparação das propriedades dos micocompósitos e sua relevância para a fabricação de produtos em setores diversos.

Propriedade	Isolante térmico	Isolante acústico	Painel de espuma	Embalagem (eletrônicos)	Embalagem (alimentos)	Estofados (espuma)	Agricultura (sementes)
Saúde e Meio ambiente	○	○	○	○	○	○	○
Resistência térmica	○	○	○		○		○
Resistência ao fogo	○	○	○			○	○
Respirabilidade e área de superfície	○	○			○	○	○
Antibacteriana							○
Resistência à compressão (baixa vs. EPS)			○	○	○		○
Densidade (alta vs. EPS)	○	○	○	○	○	○	○
Resistência à flexão			○		○		
Absorção de água (alta vs. EPS)							○
Estabilidade dimensional	○	○	○	○	○	○	○

Fonte: adaptado de ATTIAS *et al* (2019).

De acordo com MANAN *et al* (2021), fatores em todas as fases do crescimento do micomaterial têm influência direta nas características do produto final:

Espécie: as propriedades do material tem relação direta com a seleção da espécie a ser inoculada no substrato. A presença de aditivos no substrato como a dextrose pode gerar um material com maior elasticidade. Outro fator diretamente relacionado à espécie é a cor do produto final (HANEED *et al*, 2017);

Substrato: a composição do substrato influencia diretamente as propriedades mecânicas e físicas dos micomateriais. Fibras naturais geram um biomaterial mais rígido e resistente (YANG *et al*, 2017). Aditivos como sílica e metilcelulose melhoram a retenção de água; fator que interfere na inflamabilidade, através da redução da lignina e da celulose. Diferentes substratos também alteram as taxas de crescimento dos fungos e, conseqüentemente, características como resistência à tração, estrutura de hifas, conteúdo de quitina e absorção de água (HANEED *et al*, 2017).

Prensagem: a prensagem, tanto a frio quanto a calor, aumenta a densidade, alinha as fibras e melhora a resistência à flexão dos micocompósitos. aprimora a estrutura dos compósitos de micélios (THOEMEN, HUMPHREY, 2006). De acordo com Liu *et al* (2019), o processo de prensagem a 200°C facilita a repolimerização da lignina e acidólise por meio da ação dos radicais livres e da interação do substrato.

Parâmetros do ciclo de desenvolvimento: tempo de crescimento no substrato, condições e métodos de secagem são fatores que variam para cada espécie e substrato escolhido e influenciam significativamente as propriedades do produto final. O tempo de incubação pode variar entre 5 e 42 dias e afeta a elasticidade e as propriedades de deformação do biomaterial. Parâmetros de crescimento como temperatura, pH, umidade e níveis de oxigênio são diferentes para cada espécie para evitar a formação de macroporos. Os índices de luminosidade e CO₂ também determinam a densidade do material. Na fase de secagem, técnicas como o aquecimento por infravermelho ou micro-ondas afetam os níveis de umidade e as propriedades térmicas do material. A secagem em forno com circulação de ar é ideal para a desidratação completa (YANG *et al*, 2017).

Além dos parâmetros para o crescimento e produção citados anteriormente, SYDOR et al (2022) encontrou, por meio de revisão da literatura, os seguintes fatores fundamentais na escolha da espécie para o desenvolvimento de micomateriais:

- a) Crescimento rápido e linear das hifas: reduz o tempo de produção e, conseqüentemente, reduz o consumo de energético do processo, além de evitar que o substrato seja excessivamente colonizado;
- b) Alta dominância: essencial para superar outros microrganismos e obter uma cultura micelial densa e uniforme no substrato, o que resulta em um material com propriedades isotrópicas.
- c) Estrutura das hifas: Fungos com hifas monolíticas têm apenas hifas generativas e não geram cobertura micelial resistente. Recomenda-se a utilização de espécies de fungos com hifas dimíticas (mais comuns, com hifas generativas e esqueléticas ou ligadoras) ou trimíticas (compostos por todos os três tipos de hifas), que geram micocompósitos com maior resistência.
- d) Fungos da podridão branca (*white rot fungi*): Estes fungos degradam lignina melhor do que degradam celulose, gerando um compósito com melhores propriedades físicas do que os fungos de podridão marrom (*brown rot*).
- e) Versatilidade em nutrição: os fungos utilizados na produção de micocompósitos precisam se desenvolver em uma ampla gama de resíduos lignocelulósicos e até outros materiais, como polímero. A variabilidade de substratos pode reduzir os custos do produto final.
- f) Alta tolerância à variações de parâmetros de substratos e condições de crescimento: a alta tolerância da espécie selecionada a variações ambientais como temperatura, umidade, condições de pH e heterogeneidade do substrato podem simplificar o processo produtivo do micomaterial.
- g) Suscetibilidade a ambientes controlados de crescimento: Fungos que respondem de forma estável a ambientes com parâmetros controlados como intensidade da luz, concentrações de oxigênio e dióxido de carbono e outros fatores apresentam crescimento hifal mais rápido e linear enquanto que evita a formação de macroporos.
- h) Fungos saprotróficos: a espécie não pode ser parasita facultativo, ou o micocompósito pode ser prejudicial à saúde humana.

i) Fungos não-micotóxicos. O fungo não deve sintetizar micotoxinas ou compostos orgânicos voláteis microbianos (mVOC), pois podem causar doenças ou até mesmo a morte de seres humanos e outros animais.

j) Biossíntese de substâncias ativas naturais: espécies adequadas para micocompósitos devem sintetizar substâncias ativas naturais, o que traz redução de custos na produção e resulta em materiais com propriedades diferenciadas.

Desenvolver produtos de origem biológica, como os micomateriais, envolve uma rigorosa estrutura de mitigação de riscos. O gráfico a seguir é uma síntese dos principais fatores a serem monitorados durante o todo o ciclo produtivo:

Figura 6 - Fatores de mitigação de riscos para a produção de micocompósitos

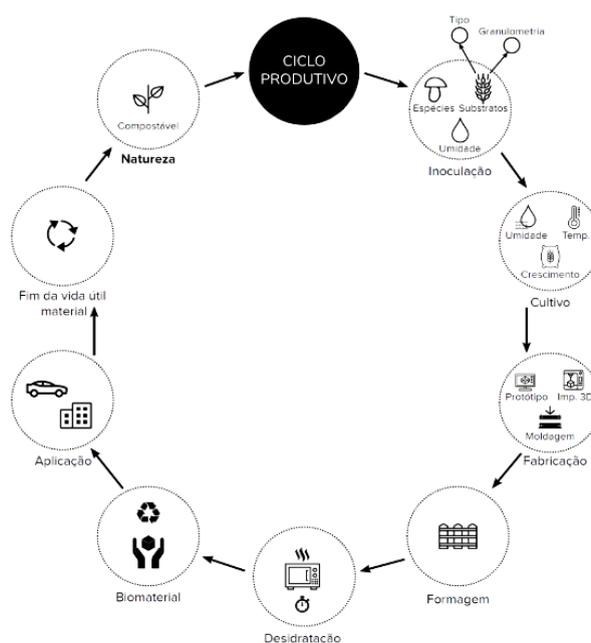


Fonte: adaptado de VAN DEN BRANDHOF e WÖSTEN (2022)

3 - REVISÃO DE LITERATURA

3.1 - Fabricação digital e micomateriais

Figura 7 - Ciclo produtivo de micocompósitos com fabricação digital



Fonte: gráfico do autor (2022)

Para o desenvolvimento de micocompósitos, o método mais citado na literatura é o crescimento em um molde com geometria pré definida. Tanto o formato quanto o processo de fabricação do molde influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do produto final (ELSACKER *et al* 2019, YANG *et al*, 2017). Características como forma, densidade e rigidez dependem do tipo de molde no qual a mistura foi inserida e o tipo de substrato (ALANEME *et al*, 2023; ELSACKER *et al*, 2020). À medida que as hifas se desenvolvem no meio nutritivo, a rede micelial se estende e resulta em um biomaterial no formato do molde (ALANEME *et al*, 2023; JIANG *et al*, 2016).

Tecnologias de fabricação digital são as mais citadas na literatura para a produção de micocompósitos, a partir de modelagem em 3D, tecnologias de manufatura aditiva e manufatura subtrativa (BITTING *et al*, 2022).

Manufatura subtrativa: compreende processos de retirada de material, por usinagem, corte, ou outros processos subtrativos. É aplicada na produção de micocompósitos rígidos e de grande porte, como painéis acústicos ou estruturas

arquitetônicas como pavilhões ou painéis térmicos. A vantagem deste processo é a eliminação de produção prévia de moldes. Mas há desvantagens como a dificuldade de adquirir precisão em um material naturalmente fibroso, e a constante necessidade de esterilização do equipamento para evitar contaminação. Apesar destes fatores que dificultam a implementação desta tecnologia em grande escala, aprimoramentos nos processos de usinagem de precisão e corte por arame apresentam resultados promissores (BITTING *et al*, 2022). A usinagem, por exemplo, é um tipo de manufatura subtrativa, aplicada tanto para painéis quanto para estruturas com maior volume. Neste caso, compósitos de micélio são utilizados em substituição a placas de materiais como mdf (fibra de média densidade), poliestireno (PPE), geralmente descartados no meio ambiente. Estes micomateriais produzidos em placas podem ser usinados antes ou depois de serem esterilizados, ou após a etapa de prensagem. Recomenda-se a usinagem com o micélio inerte para evitar contaminação.

Ainda segundo BITTING *et al* (2022), o corte por fio de arame abrasivo é outro método de manufatura subtrativa aplicado à produção de micocompósitos de grande porte. As vantagens estão na rapidez, e na precisão (ELSACKER *et al*, 2017), o que possibilita cortes de menor espessura e mais possibilidades de desenhos, além de não gerar poeira excessiva durante o processo de corte.

Manufatura Aditiva: esta tecnologia de fabricação digital amplamente utilizada para a produção de objetos tridimensionais consiste na deposição gradual do material. Este método possibilita a produção de formas complexas com precisão e velocidade, o que o torna adequado para a produção de peças complexas para prototipagem rápida em pequenas quantidades e sem custos adicionais (SINGH, T. *et al*, 2020 ; BITTING *et al*, 2022). A versatilidade desta tecnologia permite a adoção de materiais das mais variadas tipologias como líquidos, sólidos, porosos ou gasosos (BOSE, S. *et al*, 2020 ; BITTING *et al*, 2022)

Aplicada à produção de micocompósitos, o material utilizado para a deposição gradual é a mistura do substrato com o inóculo adicionado previamente ou durante o processo de deposição do material. Este mesmo processo é aplicado para a produção de biotecidos na Medicina Regenerativa e Bioengenharia.

Figura 8 - Manufatura aditiva utilizando micocompósitos como biomaterial



Imagem em *Creative Commons*. Fonte: SHARMA; MALAVIYA (2023)

A tabela a seguir reúne os tipos de micocompósitos e métodos de fabricação mais utilizados:

Tabela 4 - revisão da literatura de micocompósitos com finalidades e métodos de fabricação

Autores	Escopo acadêmico	Método de processamento	Finalidade	Espécies	Componentes do substrato	Método de fabricação
Holt <i>et al</i> (2012)	materiais de base biológica	espuma	embalagem	<i>Ganoderma sp.</i>	Subprodutos de algodão: caule de algodão, semente de algodão	molde polímero
Pelletiere <i>t al</i> (2013)	materiais de base biológica agrícola	espuma	isolante acústico	<i>Basidiomycetes</i>	palha de arroz, fibra de coco, fibra de juta, fibra de sorgo, fibra de algodão, caule de hibisco	molde polímero
Jiang <i>et al</i> (2014a)	engenharia mecânica	laminado	sola de sapato	...	tecido têxtil e cola natural (água, amido, maltodextrina), caule de hibisco	molde de pele laminada
Travaglini <i>et al</i> (2013)	materiais de base biológica	espuma	embalagem isolante	<i>G. lucidum</i>	madeira de carvalho vermelho	molde polímero
Arifin and Yusuf (2013)	mecânica e manufatura	espuma	embalagem isolante	...	arroz branco de farinha de trigo	molde polímero
Jiang <i>et al</i> (2014)	engenharia mecânica	laminado + núcleo de espuma	estrutura	...	núcleo: hibisco e cânhamo. Peles têxteis: biotex juta, linho, fibra de celulose	molde de pele a vácuo
He <i>et al</i> (2014)	engenharia civil	espuma	estrutura	<i>oyster mushroom</i>	casca de sementes de algodão, látex de borracha de estireno-butadieno látex de borracha (sbr), agente de acoplamento de sílica	molde de vidro
Travaglini <i>et al</i> (2014)	compósitos	laminado + núcleo de espuma	compensado de compósitos	<i>G. lucidum</i>	...	molde de pele a vácuo

Autores	Escopo acadêmico	Método de processamento	Finalidade	Espécies	Componentes do substrato	Método de fabricação
Jiang <i>et al</i> (2014a)	engenharia mecânica	laminado + núcleo de espuma	sola de sapato e revestimento	...	palha de milho moída: camadas de reforço: juta têxtil, tapete de kenaf, cola: Amido de milho industrial G242, cola de maltodextrina	molde de pele laminada
Travaglini <i>et al</i> (2015)	compósitos	laminado + núcleo de espuma	painéis de isolamento	...	...	molde de pele laminada em polímero PP
Lelivelt <i>et al</i> (2015)	arquitetura	espuma	espuma de isolamento	<i>C. versicolor</i> <i>P. ostreatus</i>	lascas de madeira, feno de cânhamo, fibra de cânhamo solta e não tecido, esteiras de fibra de cânhamo	molde polímero
Ziegler <i>et al</i> (2016)	agricultura	laminado + núcleo de espuma	embalagem	...	núcleo: algodão (resíduos de colheita), casca de cânhamo: tapete tecido ou não tecido.	molde polímero
Ziegler <i>et al</i> (2016)	arquitetura	espuma	estrutura	<i>P. ostreatus</i>	serragem de madeira (não especificada)	molde de compensado
Parisi <i>et al</i> (2016)	design	espuma	não especificado	...	Ecovative DIY e sementes de psyllium, chia e linho	molde polímero
Travaglini <i>et al</i> (2016)	compósitos	espuma prensada	manufatura subtrativa	<i>G. lucidum</i>	Madeira e aditivos (não especificados)	molde polímero
Mayoral Gonzalez <i>et al</i> (2016)	engenharia mecânica	espuma	revestimento estrutural	<i>L. edodes</i> <i>P. ostreatus</i> <i>G. lucidum</i>	aparas de madeira (não especificadas), palha, talo de milho e molde (impressão CNC/3D/	molde (CNC/impressão 3D/ cortadora a laser)
Mayoral Gonzalez <i>et al</i> (2016)	engenharia de materiais de base biológica	espuma	embalagem de alimentos	<i>Pleurotus sp</i>	resíduos de trigo (<i>Triticum sp.</i>)	<i>Pleurotus sp</i> resíduos de trigo (<i>Triticum sp.</i>) mofo de madeira
Jiang <i>et al</i> (2016)	engenharia mecânica	espuma prensada e laminada	compensado	...	Núcleo: palha de milho, cânhamo; Casca: (a) Biotex Juta, (b) Biotex linho e (c) fibra BioMid	molde de pele laminada (núcleo)
Jiang <i>et al</i> (2017)	engenharia mecânica	laminado	preform Shell	...	núcleo: juta, cânhamo casca: juta/linho (Biotex)	molde de pele laminada
Yang <i>et al</i> (2017)	engenharia civil	espuma	backfill/structure	<i>Alaska white-rot</i>	Alaska birch (<i>Betula neoalaskana</i>), millet grain, wheat bran, natural fiber, Calcium sulfate.	molde de polímero (PC cilindros)

Autores	Escopo acadêmico	Método de processamento	Finalidade	Espécies	Componentes do substrato	Método de fabricação
Pelletier <i>et al</i> (2017)	materiais de base biológica	espuma prensada e laminada	isolamento acústico	<i>Basidiomycetes</i>	Bétula do Alasca (Betula neoalaskana), grão de painço, farelo de trigo, fibra natural, sulfato de cálcio.	molde polímero
Haneef <i>et al</i> (2017)	mycelium sheet	película de micélio	filmes de micélio	<i>G. lucidum</i> <i>P. ostreatus</i>	celulose, celulose + batata-dextrose (BDA) molde de placa de Petri	
Dahmen (2017)	architecture	espuma	revestimento	...	serragem ou resíduos agrícolas, nutrientes (não especificados)	molde de isopor
Jones <i>et al</i> (2017)	engenharia mecânica	espuma	isolantes espumas	<i>T. versicolor</i>	cascas de arroz, inóculo de grãos de trigo	molde polímero
Attias <i>et al</i> (2017)	design industrial e biotecnologia	espuma	biopolímero composto	<i>P. pulmonarius</i> , <i>P. ostreatus</i> , <i>P. Salmoneo</i> , <i>A. agrocybe</i>	subprodutos agrícolas: lascas de madeira de eucalipto, carvalho, pinheiro, maçã e videira	placas de petri 14 cm
Jiang <i>et al</i> (2017)	engenharia mecânica	laminado com núcleo de espuma	laminado biocompósito	...	pele: fibra têxtil natural (juta, cânhamo e celulose). núcleo: kenaf pré-cultivado - palha de milho - cânhamo Bioresina (não especificada) adicionada à matriz	molde de pele laminada
Tudryn <i>et al</i> (2018)	compósito de espuma	espuma	biopolímero compósito	<i>Basidiomycetes</i>	Resíduos agrícolas: Partículas de palha de milho; Cálcio	moldes recortados (material não especificado)
Islam <i>et al</i> (2017)	engenharia mecânica	espuma	alternativas a polímeros sintéticos	-(<i>Ecovative</i>)	calcium and carbohydrate (not specified)	moldes recortados (material não especificado)
Campbell <i>et al</i> (2017)	arquitetura	espuma	pr e-moldados de arquitetura	<i>P.ostreatus</i>	Sementes (não especificadas) misturadas com hidrogel	moldes polímeros esféricos
Appels <i>et al</i> (2018)	microbiologia	película de micélios	termopolímeros	<i>S. commune</i> <i>T. versicolor</i>	Cultura líquida estática, meio mínimo de ágar	Placa de Petri de 9 mm
Jones <i>et al</i> (2018)	ciência dos materiais e engenharia	espuma	isolamento, revestimento, construção	<i>T. versicolor</i>	Cascas de arroz, finos de vidro, grãos de trigo	100X100 × 20mm moldes de polímero
Xing <i>et al</i> (2018)	arquitetura, microbiologia	espuma	materiais isolantes	<i>O. later marginatus</i> <i>M. minor</i> <i>G. resinaceum</i>	Palha de trigo	Frascos de tecido vegetal PC 77x77 × 97 mm
Grimm and Wösten (2018)	microbiologia	revisão de fungos e economia circular	...	...	...	...

Autores	Escopo acadêmico	Método de processamento	Finalidade	Espécies	Componentes do substrato	Método de fabricação
Appels <i>et al</i> (2018)	bio-materials	espuma e espuma compressa	design de produto	<i>P. ostreatus</i> , <i>T. multicolor</i>	Palha de canola, serragem de madeira, fibras de algodão	moldes polímeros PET-G (340x340 × 40 mm)
Jiang <i>et al</i> (2018)	engenharia mecânica	pre-moldado com núcleo de espuma	biocompósitos laminados	...	...	laminado pré-moldado molde de pele
Karana <i>et al</i> (2018)	material driven design	espuma e espuma compressa	design de produto	<i>Trametes sp</i> , <i>S. Commune</i>	partículas de pão, casca de banana, resíduos de café, bolinhas de isopor, flores, casca de laranja, folhas de cenoura, papelão, serragem, palha	moldagem de polímero
Islam <i>et al</i> (2018)	engenharia mecânica e de materiais	espuma	não especificado	-(<i>Ecovative</i>)	cálcio e carboidratos (não especificado)	molde
Girometta <i>et al</i> (2019)	ciências do meio ambiente	revisão das propriedades dos micocompósitos	...	...	...	...
Elsacker <i>et al</i> (2019)	arquitetura	espuma	construção	<i>T. versicolor</i> .	cânhamo, resíduos de linho, madeira macia, palha > processamento variado: solto, picado, em pó, pré-comprimido e estopa	molde em PVC
Sun <i>et al</i> (2019)	produtos para reflorestamento	hybrid wood panel composites	embalagem	(<i>Ecovative</i>)	uma mistura de partículas de aglomerado de abeto, pinho e abeto (SPF)	molde em prensa quente/frio
Matos <i>et al</i> (2019)	agronomia	espuma	embalagem	<i>L. edodes isolates</i>	à base de pó de coco suplementado com farelo de trigo	molde polímero
Wimmers <i>et al</i> (2019)	engenharia	espuma	placas de isolamento térmico	<i>F. pinicola</i> <i>G. sepiarium</i> <i>L. sulphureus</i> <i>P. schweinitzii</i> <i>P. betulinus</i> , <i>P. ostreatus</i> <i>P. arcularius</i> <i>T. pubescens</i> <i>T. suaveolens</i> <i>T. abietinum</i> "	aparas de madeira de <i>Betula papyrifera</i> (bétula), <i>Populus tremuloides</i> (álamo), <i>Picea glauca</i> (abeto), <i>Pinus contorta</i> (pinheiro), <i>Abies lasiocarpa</i> (abeto) Adição de solução nutritiva: peptona, extrato de malte e levedura	Molde polímero retangular ou bandeja de alumínio: 20x20x3cm
Attias <i>et al</i> (2019)	indústria e biotecnologia	espuma	placas de isolamento térmico e recipiente de água	<i>C. versicolor</i> <i>T. multicolor</i> <i>G. sessile</i>	lascas de madeira para poda de videiras e macieiras misturadas com 1% de farinha e 3% de palha de trigo	molde polímero: PP: Ø 10cm 2.5 cm Molde em 3D PMMA: 20x20x2cm molde polímero em PLA:

Autores	Escopo acadêmico	Método de processamento	Finalidade	Espécies	Componentes do substrato	Método de fabricação
Bruscato <i>et al</i> (2019)	biotecnologia	espuma	alternativa ao eps	P. sanguineus P. albidus L. velutinus	Serragem de madeira de Pinus sp., farelo de trigo e carbonato de cálcio	molde polímero: & 10cmx6cm
Hyde <i>et al</i> (2019)	micologia aplicada	revisão do potencial industrial dos fungos	...	...	...	...

Fonte: adaptado de ATTIAS *et al* (2019).

3.2 - Mercado

De acordo com relatório divulgado pela consultoria de pesquisa de mercado Straits (<https://straitsresearch.com/report/mycelium-market>) publicado em dezembro de 2023, o mercado global de materiais de micélios, que em 2022 foi avaliado em 2.85 bilhões de dólares, deve alcançar 5,61 bilhões de dólares até 2030, atingindo um crescimento de 7,8% de 2022 a 2030. A mudança de estratégias de mercado adotadas pelas empresas, motivadas pelos princípios do modelo de gestão ESG (sigla em inglês para os termos meio ambiente, sustentabilidade e governança corporativa) trouxe renovação aos modelos de negócio, que agora priorizam o desenvolvimento sustentável e a Economia Circular. Neste contexto, produtos feitos a partir de compósitos de micélios surgem como alternativa a materiais poluentes não-biodegradáveis. Por meio de incentivos à pesquisa e desenvolvimento em países europeus, a biotecnologia voltada para o setor neste mercado europeu deve possibilitar um índice de crescimento do mercado de 7,3% até 2030, conforme o estudo publicado pela consultoria.

Um carro médio contém, incorporados à estrutura, aproximadamente 150 kg de polímero e cerca de 1160 kg de aço. Por apresentar vantagens como leveza, versatilidade e flexibilidade, os polímeros são predominantes no design de interiores, assentos, pára-choques, painéis externos e componentes elétricos (PRASANTH *et al*, 2021). Mas a necessidade de adoção de cadeias produtivas mais sustentáveis está trazendo o interesse industrial pela adoção de materiais de base biológica na fabricação automotiva: a Stellantis tem a meta de se tornar carbono neutro até 2038 (STELLANTIS, 2023); a Ford já utiliza 8 biomateriais em sua linha de veículos,

produzidos a partir do reuso de resíduos da produção de tequila (FORD, 2020). A Volvo publicou em 2021, o relatório “A Ascensão do Design Consciente”, *The Rise of Conscious Design* (VOLVO, 2021), em que explora o desenvolvimento e aplicação de novos materiais, e a BMW apresenta um projeto ambicioso de descarbonização até 2030, e parcerias com startups para o desenvolvimento de novos materiais (BMW GROUP, 2023). No entanto, a oferta atual de resíduos de base biológica e o nível das pesquisas nesta área ainda são insuficientes para atender à crescente demanda de produção deste setor. Desta forma, embora haja uma tendência clara no uso de materiais de base biológica, ainda são necessários um maior grau de desenvolvimento e dimensionamento dos recursos para biomateriais em aplicações automotivas (PRASANTH *et al*, 2021).

Como uma indústria no setor de biotecnologia, a alta tecnologia empregada para a manipulação das propriedades de um produto de origem biológica como os micélios proporciona alta diversificação ao mercado. A tabela a seguir lista as empresas que atuam globalmente neste mercado, nos mais diversos setores:

Tabela 5 - Maiores empresas de biomateriais a base de fungos e valores de investimentos captados

Materiais à base de Fungos			
Companhia	Produtos	Valor Captado	Referência
Chinova Bioworks	Medicamento	US\$ 12.1 M	www.chinovabioworks.com
Bolt Threads	Tecidos	US\$ 334.1 M	www.boltthreads.com
Ecovative LLC.	Alimentos, couro, embalagem, isopor	US\$ 121 Mi	www.ecovative.com
EniferBio	Proteína	US\$ 12.1 Mi	www.enifer.com
ENOUGH	Proteína	US\$ 121.7 K	www.enough-food.com
Groundwork BioAg	Fertilizantes	US\$ 30.1 Mi	www.groundworkbioag.com
Meati Inc.	Proteína	US\$ 274.5 K	www.meati.com
Mogu	Painel acústico, pisos	US\$ 2.1 Mi	www.mogu.bio

Companhia	Produtos	Valor Captado	Referência
Mycoworks	couro	US\$ 62 Mi	www.mycoworks.com
Mycorena	Proteína	US\$ 37.7 Mi	www.mycorena.com
Magical Mushroom Company	embalagens	US\$ 3 Mi	www.magicalmushroom.com
Monaghan Group	Proteína	não divulgado	www.monaghan.eu
Nature's Fynd	Proteína	US\$ 509.6 M	
Norwegian Mycelium AS	alimentos, couro	confidencial	www.nomy.no
Biomyc	embalagens	US\$ 57,1K	www.biomyc.com
Mycel Project, Ltd	couro	US\$ 11,2M	www.mycelproject.com
Mushroom Material	embalagens	US\$ 280 K	www.mushroommaterial.com
MYCL Mycotech Lab	couro	US\$ 1,4 Mi	www.mycl.bio
Mycellium Co.	vaso de plantas, painéis de isolamento térmico	US\$ 1,4 M	www.mycellium.co
Prime Roots	Proteína	US\$ 48.5 M	www.primeroots.com

Fonte: <https://pitchbook.com/> e <https://www.crunchbase.com> acessados em 23/01/24.

Embora praticamente desconhecidos no Brasil, biomateriais derivados de micélio já movimentam uma indústria bilionária nos EUA e Europa. Empresas como Ecovative e Mycoworks, ambas norte-americanas, lideram o mercado no setor de embalagens e couro vegano, mas a inglesa Bolt Threads recebeu aportes vultosos para produzir tecidos, conforme demonstrado no gráfico interativo a seguir:

Figura 9 - Histórico de investimentos em startups de biomateriais de micélios

Linha do tempo dos investimentos nas 3 principais startups do setor de biomateriais, de 2012 a 2023.

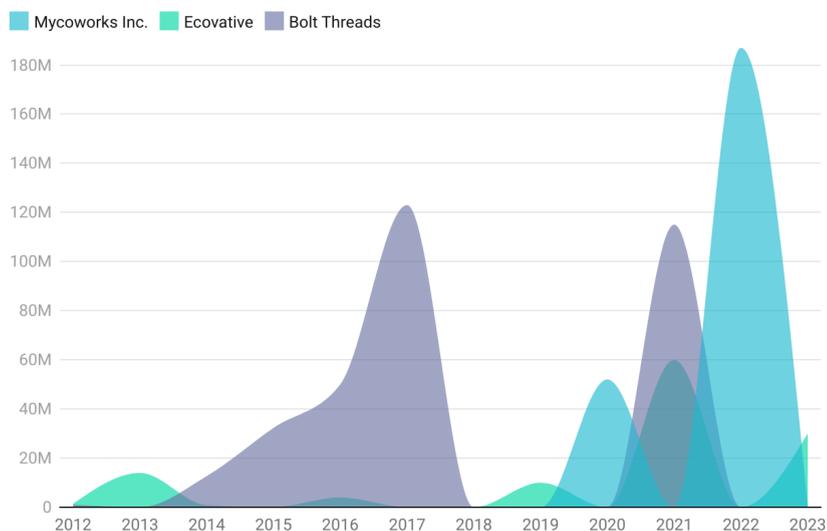


Chart: Carla Queiroga werkhaizer • Source: Crunchbase • Created with Datawrapper

Fonte: elaborado pelo autor. Link: <https://datawrapper.dwcdn.net/Oybm0/2/> atualizado em 23/01/24.

3.3 - Propriedade Intelectual

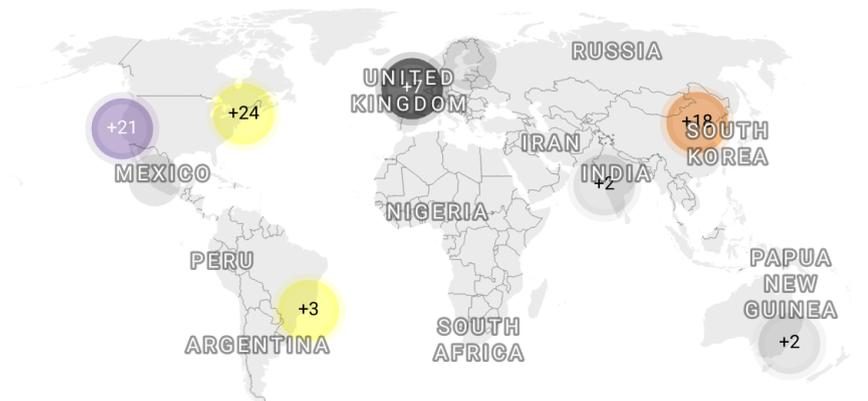
O registro de patentes do setor apresenta desempenho acelerado, como demonstra o mapa interativo a seguir:

Figura 10 - Mapa de patentes de biomateriais de micélios

A indústria de biomateriais de micélios é recente. Mas é notável o aumento do número de registros globais de patentes das marcas mais importantes do setor, revelando um crescimento acelerado deste mercado.

Main mycelium materials brands

Chinese researchers Bolt threads Chinese researchers Ecovative Modern Meadow Inc.
Mogu Mycovation Mycoworks others



Map: Carla Queiroga Werkhaizer • Source: Espacenet • Created with Datawrapper

Fonte: elaborado pelo autor. Link: <https://datawrapper.dwcdn.net/6w5ST/3/> atualizado em 23/01/24.

3.4 - Legislação

A despeito das definições de biopolímeros existem normas que auxiliam a avaliação destes novos materiais, como a norma brasileira ABNT NBR 15448-2 (2008), às normas americanas ASTM D 6400 (2012) para polímeros compostáveis, ASTM D 6868 (2011) para revestimentos de papel e outros substratos compostáveis e, ainda, as normas europeias EN 13432 (2000 + AC 2005) para embalagens e EN 14995 (2006) para materiais, que garantem biodegradabilidade, rápida compostabilidade e geração de substâncias não-tóxicas. Sistemas de certificação estabelecidos pelo Biodegradable Products Institute – BPI, DIN/CERTCO e outras instituições atestam o desempenho de materiais biodegradáveis. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define biopolímero como “polímero ou copolímero produzido a partir de matéria-prima de fonte renovável” (ABNT NBR 15448-1, 2008).

No contexto de legislação, um dos principais desafios se concentra nas conformidades regulatórias de uso e aplicação que ainda não existem para esse tipo de material. O grande apelo ecológico quanto à diminuição do uso de polímeros pode fomentar o uso. No âmbito da cidade de Belo Horizonte, por exemplo, a lei número 11.547/2023, de 13 de julho de 2023, reclassifica os rejeitos da mineração em resíduos sólidos de baixa toxicidade, e permite o uso, inicialmente, apenas na construção civil. Esta abertura legal pode ser um passo importante para a regulamentação do uso de biomateriais.

A tabela abaixo sintetiza as normas e legislação a serem cumpridas no desenvolvimento de polímeros pela indústria brasileira:

Tabela 6 - normas e legislação a serem cumpridas no desenvolvimento de polímeros pela indústria brasileira

Norma	Descrição
ASTM D3039:17	Método de teste padrão para propriedades de tração de materiais compostos de matriz de polímero
ASTM C1557	Método de teste padrão para resistência à tração e módulo de Young de fibras
ASTM D638	Método de ensaio padrão para Propriedades de tração de polímeros
ASTM D412	Métodos de teste padrão para borracha vulcanizada e elastômeros termopolímeros - tensão

Norma	Descrição
ASTM D882	Método de ensaio padrão para Propriedades de tração de lâminas finas de polímero
ASTM D638	Método de ensaio padrão para Propriedades de tração de polímeros
ISO 527-1	polímeros - Determinação das propriedades de tração - Parte 1: Princípios gerais
ISO 1798	Materiais poliméricos celulares flexíveis - Determinação da resistência à tração e alongamento na ruptura
ISO 2440	Materiais poliméricos celulares flexíveis e rígidos - Testes de envelhecimento acelerado
ASTM D3767	Prática Padrão para Borracha - Medição de Dimensões
ASTM C165 - 07	Método de teste padrão para medir propriedades compressivas de isolamentos térmicos
ASTM D695	Método de teste padrão para propriedades compressivas de polímeros rígidos
ASTM D1621	Método de teste padrão para propriedades compressivas de polímeros celulares rígidos
ISO 604	polímeros - Determinação das propriedades compressivas
ISO 844	polímeros celulares rígidos - Determinação das propriedades de compressão
ISO 178	polímeros - Determinação das propriedades de flexão
ASTM C203 - 05a	Standard Test Methods for Breaking Load and Flexural Properties of Block-Type Thermal Insulation
ASTM D790	Breaking Load and Flexural Properties of Block-Type
ASTM D256	Métodos de teste padrão para determinar a resistência ao impacto do pêndulo de Izod de polímeros
ASTM D6110	Método de teste padrão para determinar a resistência ao impacto de Charpy de amostras entalhadas de polímeros
ISO 179	polímeros - Determinação das propriedades de impacto Charpy - Parte 1: Teste de impacto não instrumentado
ISO 180	polímeros - Determinação da resistência ao impacto Izod
ASTM D1709	Métodos de teste padrão para resistência ao impacto de filme polímero pelo método de dardo em queda livre
ISO 4649	Borracha, vulcanizada ou termoplástica — Determinação da resistência à abrasão usando um dispositivo de tambor cilíndrico rotativo
ASTM D4060	Método de teste padrão para resistência à abrasão de revestimentos orgânicos pelo Abraser Taber
DIN 53 516	Teste de borracha e elastômeros; determinação da resistência à abrasão
ASTM D624	Método de teste padrão para resistência ao rasgo de borracha vulcanizada convencional e elastômeros termopolímeros
ISO 34	Borracha, vulcanizada ou termoplástica - Determinação da resistência ao rasgo - Parte 2: peças de teste pequenas (Delft)

Norma	Descrição
ASTM D570	Determinação da Absorção de Água em Material polímero
ISO 10534	Acústica - Determinação do coeficiente de absorção de som e impedância em tubos de impedância - Parte 1: Método usando relação de onda estacionária
ASTM C518:21	Método de teste padrão para propriedades de transmissão térmica de estado estacionário por meio do aparelho medidor de fluxo de calor
DIN 52 612	Teste de Materiais Isolantes Térmicos; Determinação da condutividade térmica pelo aparelho de placa quente protegida; Procedimento de teste e avaliação
ASTM D257	Determinação da Resistividade Elétrica Volumétrica e Superficial em Materiais Isolantes
ASTM D3850	Análise Composicional de Materiais Isolantes Elétricos Sólidos por Termogravimetria (TGA)
NBR 14432	Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento
NBR 5628	Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo
FIAT 50416	Temperatura de Fragilidade em Elastômeros e Termopolímeros
ASTM D2240	Método de teste padrão para propriedade de borracha - Dureza do durômetro polímeros e ebonita - Determinação da dureza de indentação por meio de um durômetro (dureza Shore)
ISO 868	Materiais poliméricos celulares flexíveis e rígidos - Testes de envelhecimento acelerado
ISO 2440	Materiais poliméricos celulares flexíveis e rígidos - Testes de envelhecimento acelerado
ASTM D785	Método de teste padrão para dureza Rockwell de polímeros e materiais isolantes elétricos
ISO 2039	polímeros - Determinação da dureza - Parte 2: Dureza Rockwell
ASTM D1415	Método de teste padrão para propriedade de borracha - dureza internacional
ISO 48	Borracha, vulcanizada ou termoplástica - Determinação da dureza (dureza entre 10 IRHD e 100 IRHD)
ISO 2781 - mét. A	Borracha vulcanizada ou termoplástica - Determinação da densidade
ASTM D1894	Método de teste padrão para coeficientes estáticos e cinéticos de fricção de filme polímero e folhas
ISO 8295	polímeros - Películas e lonas - Determinação dos coeficientes de atrito

4. METODOLOGIA

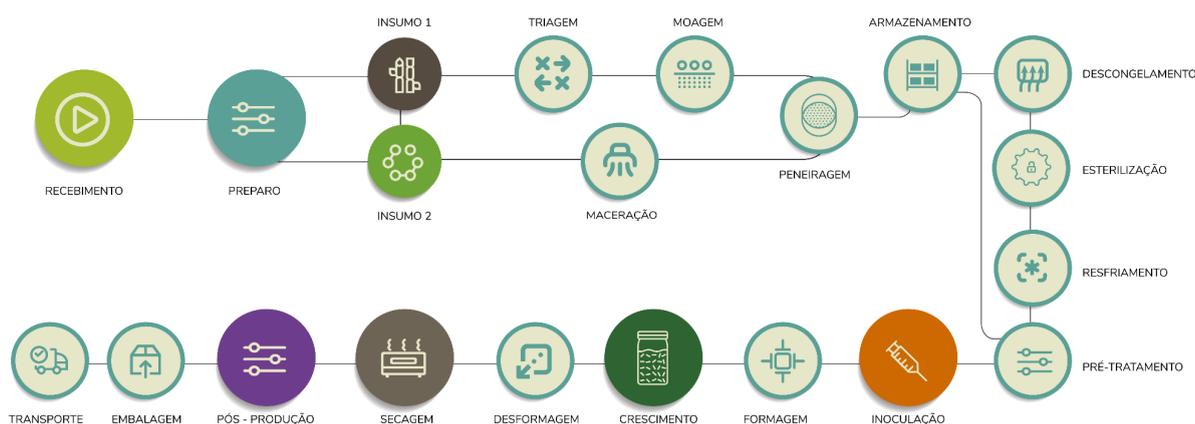
O caráter interdisciplinar deste grupo de pesquisa evoca a sincronização de metodologias de campos de conhecimento como o *Growing Design*, Engenharia de Materiais, Biologia e Biotecnologia. Dentro desta perspectiva, o ponto de partida

desta pesquisa é o aprimoramento do protocolo de produção descrito no pedido de patente de número BR 1020200135686.

Neste capítulo serão apresentadas as etapas de produção dos corpos de prova e os primeiros testes de caracterização nos laboratórios da Stellantis. As etapas de padronização e produção dos corpos de prova foram executadas entre outubro de 2022 e agosto de 2023 no Laboratório de Biologia Molecular e Computacional de Fungos (ICB-UFMG), Laboratório de Biologia Sintética Idea Real (ICB-UFMG) e Laboratório de Caracterização de Materiais (EE-UFMG).

4.1 - Ciclo de produção

Figura 12 - Fluxograma de produção de micocompósitos.



Fonte: gráfico do autor (2023)

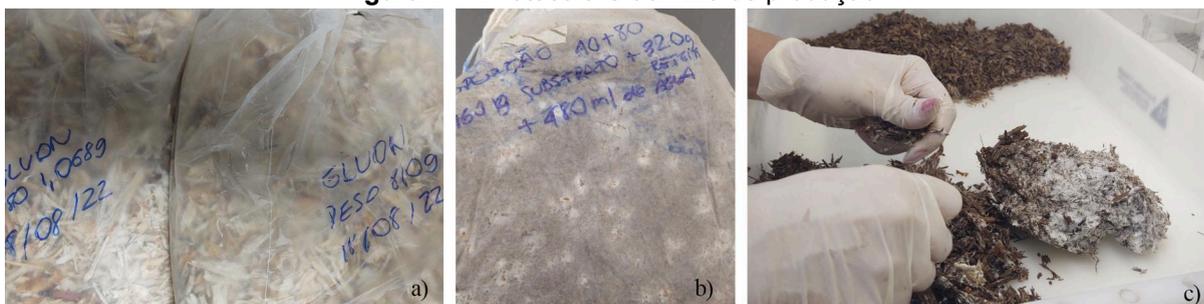
As etapas de produção do micocompósito estão representadas na Figura 1 acima. O insumo 1 corresponde ao resíduo agrícola enquanto que o aditivo mineral está representado como insumo 2. A primeira etapa é o **recebimento do resíduo** agrícola *in natura*, direto do fornecedor. Uma amostra de 50 g do lote é retirada para o controle de qualidade. A **triagem** ocorre de forma manual, para a retirada de impurezas do resíduo agrícola recebido. Na **moagem**, o resíduo agrícola é moído em moinho de facas em granulometria entre 0,04 e 0,4 cm. A **peneiragem** é baseada na Norma Técnica NBR 17054/2022, “Agregados - Determinação da Composição Granulométrica, Método de Ensaio”, com o ensaio de granulometria realizado em um conjunto de peneiras com malhas de diferentes tamanhos. Na

etapa seguinte, **armazenamento**, o resíduo agrícola é encaminhado para o freezer -10C° C, em sacos de 2 kg. O **descongelamento** do resíduo agrícola é a etapa seguinte, até 24h, em temperatura ambiente. A **esterilização/resfriamento** do resíduo agrícola são as etapas anteriores à mistura com o insumo 2, feitos em polímeros de autoclave, quase na totalidade fechados com barbante, por 30 minutos, a 121°C e, após a esterilização, aguarda-se até o insumo atingir a temperatura ambiente. Na etapa de **inoculação**, a mistura, já em temperatura ambiente, recebe o trigo inoculado na proporção 5:1. Os sacos inoculados são então acondicionados em estufas de crescimento na temperatura entre 25°C e 30°C por 7 dias, sendo que após 4 dias os sacos devem ser novamente misturados para estimular a melhor colonização do fungo no substrato. Na etapa de **formagem**, após a assepsia em solução de hipoclorito de sódio diluído em água a 2%, as fôrmas ficam em câmara de fluxo laminar sob radiação UV por 30 minutos. A mistura, então em processo de crescimento de micélios, é inserida em moldes geométricos de PETG e protegida com polímero PVC com furos para a entrada de ar necessária para o crescimento micelial.

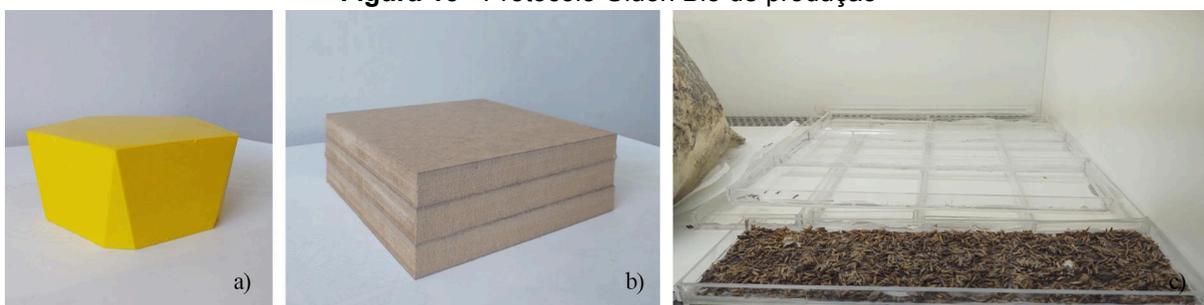
A etapa de **crescimento** é feita com as fôrmas acondicionadas em câmaras de crescimento BOD, na temperatura 27°C e umidade 60 a 70°C. O tempo de crescimento pode variar de acordo com o volume do compósito, sendo o tempo médio de 7 a 21 dias. Já na etapa de **desformagem**, os micocompósitos devem ser retirados das fôrmas sem o auxílio de qualquer instrumento que possa causar avarias, evitando assim que o micocompósito ainda vivo desmanche. Na **secagem**, os micocompósitos são inseridos em estufas de secagem em temperaturas e períodos de tempo diretamente relacionados ao volume do micocompósito. A etapa seguinte de **pós-produção** ainda está em revisão da literatura.

Figura 13 - Inoculação

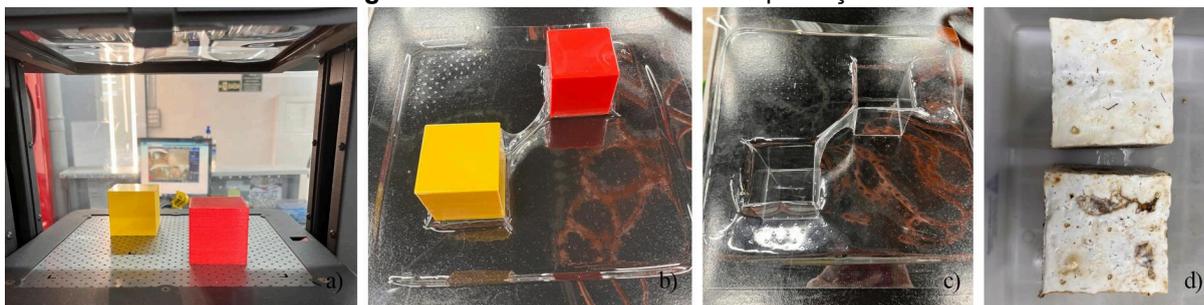
Trigo em grãos colonizado de Micélios da espécie *Ganoderma sessile* para inoculação em substrato. Fonte: imagem do autor (2022)

Figura 14 - Protocolo Gluon Bio de produção

a) Congelamento: Bagaço de cana de açúcar - resíduo agrícola de produtores de cachaça, preferencialmente orgânico. Após esterilização em autoclave, é congelado. b) Substrato inoculado com o fungo já em processo de formação de micélios. c) Mistura inoculada em estágio avançado de colonização sendo preparada para a formagem. Fonte: imagens do autor (2022).

Figura 15 - Protocolo Gluon Bio de produção

Produção de moldes: Três tipos de técnica empregadas para a produção dos moldes, utilizadas de acordo com o nível de complexidade da geometria do micocompósito desejado. a) Matriz em impressão 3D para geometrias mais complexas. b) Molde produzido em cortadora CNC para formatos sem padrões geométricos. c) Fôrma produzida em acrílico transparente 2mm, o que exclui a necessidade de molde para produção da fôrma. Etapa executada no Fab Lab Newton. Fonte: imagens do autor (2023).

Figura 16 - Protocolo Gluon Bio de produção

Produção de fôrmas em termoformagem à vácuo a partir de moldes produzidos em impressão 3D. a) Moldes posicionados no equipamento de termoformagem. b) Molde produzido em cortadora CNC para formatos sem padrões geométricos. c) Forma produzida em acrílico transparente 2mm, o que exclui a necessidade de molde para produção da fôrma. Etapa executada no Fab Lab Newton. Fonte: imagens do autor (2023).

Figura 17 - Protocolo Gluon Bio de produção

Formagem: a) ; c) Mistura inserida em formas de PETG, fechadas com insulfilm e armazenadas em estufa de cultivo ou BOD. b) ; d) Micocompósito pronto para desformagem. Fonte: imagens do autor (2023)

Figura 18 - Protocolo Gluon Bio de produção

Micocompósitos são retirados das fôrmas de PETG e aquecidos em estufa de secagem e esterilização. Fonte: imagens do autor (2023)

Figura 19 - Protocolo Gluon Bio de produção

Micocompósitos produzidos para os primeiros testes de caracterização. Fonte: imagem do autor (2023)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Testes de Caracterização

A parceria firmada em abril de 2022 com o setor de testes de Novos Materiais da Stellantis para a América Latina tem como objetivo utilizar os laboratórios de testes de materiais da montadora em Betim (MG) para identificar nos micocompósitos propriedades similares aos polímeros atualmente utilizados para a produção de revestimentos automotivos. As propriedades identificadas nos testes de caracterização podem revelar possibilidades de utilização do biomaterial como substitutivo para algum componente. Para tanto, a equipe da Supervisão de Novos Materiais elaborou um planejamento de testes com as propriedades importantes para revestimentos automotivos (tabela abaixo).

Tabela 8 - Planejamento de testes de caracterização proposto pela Supervisão de Novos Materiais

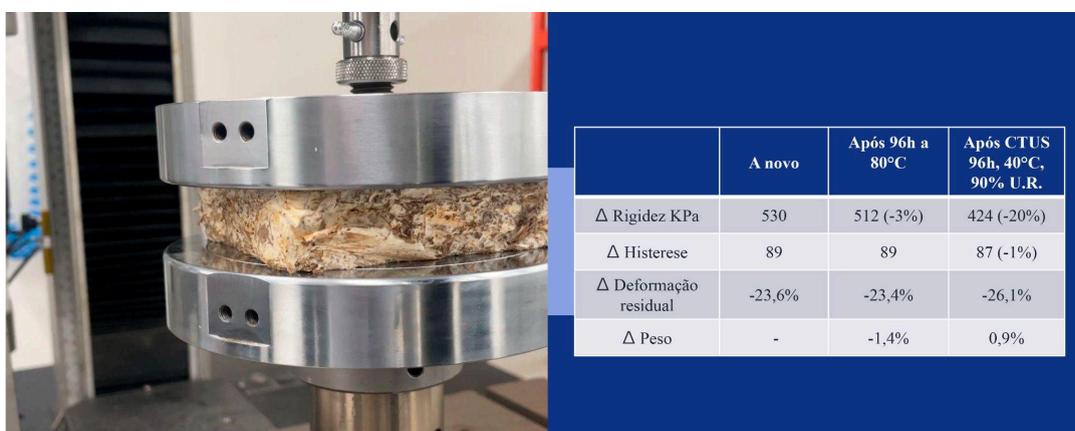
Propriedade	Quantidade	Formato	
Densidade	10	50x50x50mm	
Flamabilidade	10	350x100x13mm	
Propriedades de compressão	Deflexão por compressão, 50% deflexão	10	100x100x50mm
	Histerese		
	Conjunto de compressão		

Propriedade		Quantidade	Formato
Alteração após envelhecimento em forno	Deflexão por compressão, 50% deflexão	10	100x100x50mm
	Histerese		
	Conjunto de compressão		
Mudança após o envelhecimento em câmara de calor úmida	Peso	10	100x100x50mm
	Deflexão por compressão, 50% deflexão		
	Histerese		
Propriedades de tração	Conjunto de compressão	10	150x150x10mm
	Peso		
Flamabilidade	Alongamento	10	100x100x50mm
	Carga Máxima		
	Deflexão por compressão, 50% deflexão		
Absorção de água	Histerese	10	50x50x10mm
	Conjunto de compressão		
	Peso		
	Deflexão por compressão, 50% deflexão		

Fonte: *Polymers and Bio Sourced South America team - Stellantis (2022)*

Os corpos de prova foram submetidos aos primeiros ensaios, descritos juntamente com as normas correspondentes:

Figura 20 - Teste de rigidez executado no laboratório de Novos Materiais da Stellantis América Latina.



Fonte: Relatório de testes de caracterização - Stellantis (2023)

Figura 21 - Teste de compressão executado no laboratório de Novos Materiais da Stellantis América Latina.



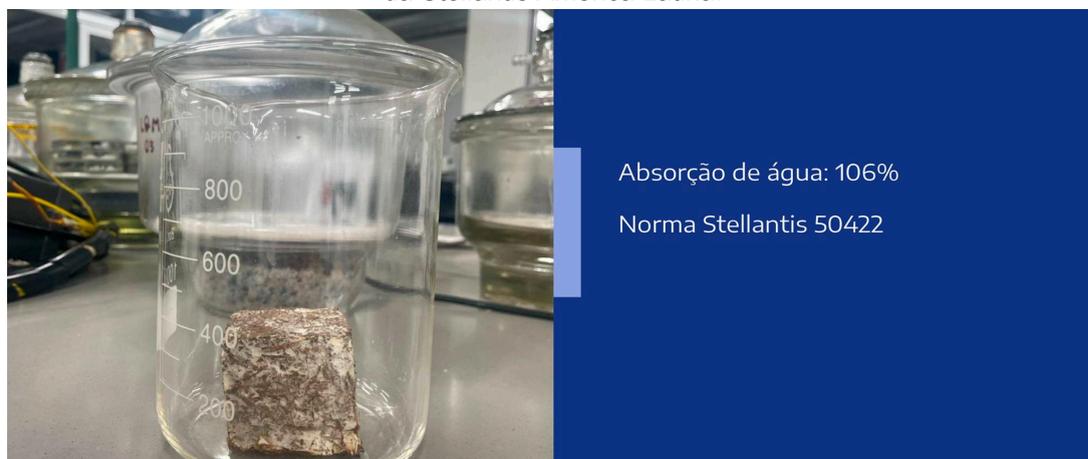
Fonte: Relatório de testes de caracterização - Stellantis (2023)

Figura 22 - Teste de flamabilidade executado no laboratório de Novos Materiais da Stellantis América Latina.



Fonte: Relatório de testes de caracterização - Stellantis (2023)

Figura 23 - Teste de absorção de água executado no laboratório de Novos Materiais da Stellantis América Latina.



Fonte: Relatório de testes de caracterização - Stellantis (2023)

Figura 24 - Teste de resistência a tração executado no laboratório de Novos Materiais da Stellantis América Latina.



Fonte: Relatório de testes de caracterização - Stellantis (2023)

Figura 25 - Teste de densidade executado no laboratório de Novos Materiais da Stellantis América Latina.



Fonte: Relatório de testes de caracterização - Stellantis (2023)

Tabela 9 - Normas utilizadas nos testes de caracterização no laboratório de Novos Materiais da Stellantis América Latina. Fonte: Relatório de testes de caracterização

Propriedade	Normas adotadas	Valores
Densidade	ISO 1183-1-B	0,27 g/cm ³
Resistência à tração	ASTM D638	0,03 N/mm ²
Compressão – Rigidez	ASTM D1621	529 kPa
Absorção de água	ASTM D570	106%
Flamabilidade	FMVSS 302	< 100 mm/min

Fonte: Stellantis (2023)

Foram verificadas também as propriedades de compressão sob diferentes condições, após 96h a 80 °C, e 96h a 40°C, e umidade relativa de 90%. A definição dessas propriedades é primordial para o direcionamento de possíveis aplicações dos micocompósitos da Gluon Bio como substituto aos principais polímeros termofixos adotados na indústria automotiva como acetato de vinil-etileno (EVA), poliestireno expandido (EPS), poliuretano (PU) e polipropileno (PP).

A Tabela 10 é um comparativo das principais propriedades dos polímeros mencionados anteriormente e as mesmas propriedades do micocompósito Gluo Bio:

Tabela 10 - Propriedades dos principais polímeros termofixos

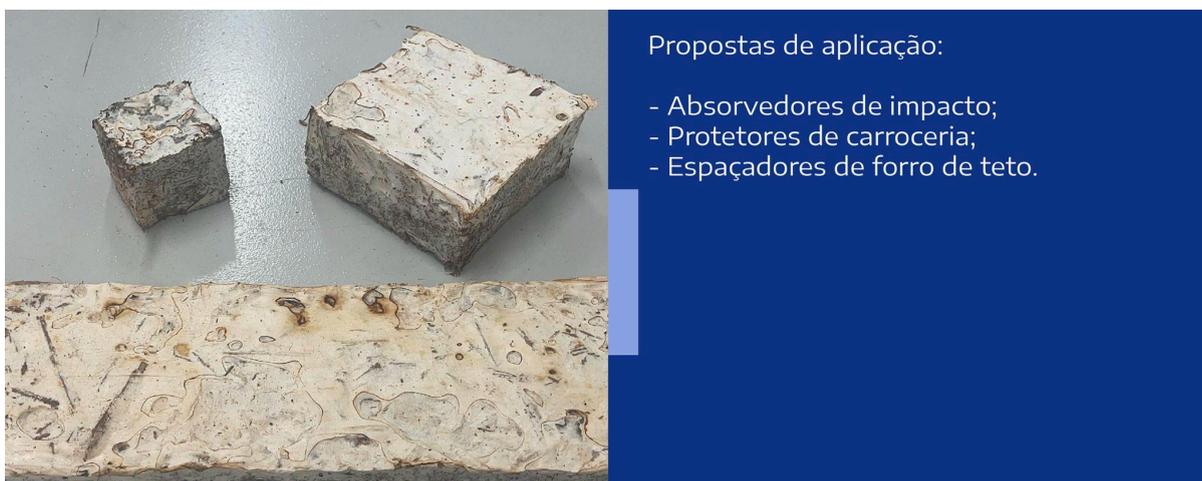
Propriedade	Polímero Termofixo	Valores
Densidade	EVA	0,19 g/cm ³
	EPS	0,01 g/cm ³
	PU	0,03 g/cm ³
	PP	0,9 g/cm ³
Resistência à tração	EVA	~3 N/mm ²
	EPS	~ 4 N/mm ²
	PU	~ 4 N/mm ²
	PP	~ 15 N/mm ²
Compressão	EVA	80 kPa
	EPS	100 kPa
	PU	140 kPa
	PP	50 kPa
Absorção de água	EVA	não encontrado %
	EPS	~102 %
	PU	não encontrado %
	PP	~100,2%

Propriedade	Polímero Termofixo	Valores
Flamabilidade	EVA	~ 80 mm/min
	EPS	~ 90 mm/min
	PU	~ 40 mm/min
	PP	~ 50 mm/min

Fontes: Alves (2014); Furtat *et al* (2014); Mano (1991); Silva (2018)

5.2. Resultados

Figura 26 - Propostas de aplicação dos microcompósitos Gluon Bio após testes de caracterização.



Fonte: Relatório de testes de caracterização - Stellantis (2023)

A análise comparativa das propriedades do microcompósito e dos principais polímeros revelou que o biomaterial produzido pela Gluon Bio apresenta vantagens competitivas, principalmente em relação à densidade, compressão, absorção de água e flamabilidade, o que valida a possível substituição dos polímeros de origem petroquímica pelos microcompósitos da Gluon Bio em materiais como absorvedores de impacto, protetores de carroceria e espaçadores de forro de teto. Resultados promissores em um primeiro teste de caracterização criaram uma atmosfera de otimismo na pesquisa, que avançou para aprimoramentos na capacidade produtiva e para a definição do primeiro protótipo piloto.

5.3. Otimização da produção

Para otimizar a produção com o objetivo de encurtar o caminho entre os primeiros testes e o protótipo adequado para validação em ambiente relevante, o grupo de pesquisa, por meio de investimento-anjo, recebeu um aporte no valor de R\$ 48,000,00, com os quais foram adquiridos equipamentos para a constituição de uma microfábrica de biomateriais com capacidade de 100 unidades/mês, conforme Figura 28:

Figura 28 - Equipamentos para microprodução de micocompósitos no Laboratório de Biologia Molecular e Computacional de Fungos (LBMCF)



a)



b)



c)



d)

a) Estufa de secagem com monitoramento de temperatura e umidade e timer; d) Moinho com controle de granulometria; c) Freezer horizontal para conservação dos resíduos agrícolas; d) Câmara climatizada para crescimento, com monitoramento de temperatura, umidade e timer. Fonte: imagens do autor (2023)

5.4. Definição de protótipo piloto

Figura 29 - Dispositivo escolhido para protótipo piloto



Fonte: imagens do autor (2023)

Após os resultados dos testes de caracterização, foi definido como protótipo piloto para testes de validação em ambiente relevante, um dispositivo anti-impacto para veículos em cegonha durante transporte para a concessionária (Figura 16). No caso do dispositivo atual, feito em polietileno (PE), são utilizadas 5 unidades em média por veículo, que somam a média de 5.850 unidades/dia, totalizando 175.500 por mês. Pela ausência de medidas de gestão de descarte deste dispositivo junto às concessionárias, o volume de lixo gerado por este dispositivo, diariamente, é de 2,2 toneladas (média para as concessionárias da região metropolitana de Belo Horizonte).

6. CONCLUSÃO

O objetivo inicial desta pesquisa era o aprimoramento do processo de produção com a incorporação das tecnologias de biofabricação digital e a criação de objetos para fins de decoração. Mas a fase de exploração do potencial microbiológico abriu todo um universo de novas possibilidades de desenvolvimento de biopolímeros, e o maior desafio se tornou então descobrir um nicho de mercado com maior potencial. Foi nesse momento que a parceria com a Stellantis trouxe de

forma técnica e bem fundamentada oportunidades reais de mercado a serem desenvolvidas em conjunto, o que levou à criação da Gluon Bio.

Figura 11 - Mostruário de micomateriais da Gluon Bio



Fonte: imagens do autor (2022)

A Gluon Bio é um grupo de pesquisa interdisciplinar criado em março de 2022, atualmente composto pelos alunos Carla Queiroga Werkhaizer, Juliana Barros Rezende e Thiago Augusto Borges Rodrigues, pós-graduandos em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual, sob a orientação dos professores Dr. Aristóteles Góes Neto (ICB-UFMG) e Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár (EE-UFMG). A equipe tem como objetivo fundar uma startup altamente inovadora no desenvolvimento, produção e comercialização de produtos feitos de biopolímeros de micélio fúngico com propriedades similares aos polímeros expandidos derivados de petróleo.

São potenciais clientes da Gluon Bio:

a) Indústria automotiva: utiliza polímeros expandidos como item de proteção veicular, como revestimento de texto, revestimento termo-acústico para painel, protetor de carroceria e dispositivo anti-impacto no trajeto fábrica-concessionária, dentre outras finalidades.

b) Indústrias de bens de consumo duráveis: utilizam polímeros expandidos como item de proteção em embalagens: fabricantes de eletrodomésticos, móveis e equipamentos eletrônicos.

c) Indústrias de bens de consumo não-duráveis: utilizam polímeros expandidos como item de proteção em embalagens: fabricantes de brinquedos, bebidas em frascos de vidro e artigos de decoração.

d) Indústrias de itens de segurança: utilizam produtos feitos de polímeros expandidos como sinalizador marítimo, bóias, amortecedores de impacto e isolantes termo-acústicos.

São parceiros da Gluon Bio:

1. Setor de Polímeros - Novos Materiais - Materiais Verdes - Stellantis América Latina - Planta de Betim - testes de caracterização e validação dos laboratórios de Novos Materiais da montadora.

2. Associação Nacional de Produtores de Cachaça - ANPAQ - entidade sediada em Belo Horizonte, a ANPAQ ajuda a identificar produtores de cachaça mais próximos para atuar como fornecedores locais dos resíduos da produção. Parceria não-remunerada.

3. Cachaça Flor das Gerais - produtor de cachaça 100% orgânica localizado em Felixlândia. Fornece bagaço de cana orgânico.

4. Mineradora Pedras Congonhas Extração Arte Indústria Ltda - fornecedor de aditivos minerais localizado em Nova Lima.

5. IDEA REAL . ICB|UFMG - Laboratório de Biologia Sintética e Biofabricação Digital - cessão de equipamentos e toda a infraestrutura de laboratório de biotecnologia em ambiente controlado, além de infraestrutura de coworking e equipamentos de biofabricação digital. Parceria com contrapartida de divulgação do laboratório como incubadora da startup.

5. FAB LAB NEWTON - Laboratório de fabricação digital do Centro Universitário Newton Paiva. Cessão dos equipamentos de fabricação digital para a produção de moldes.

6. LBMCF. ICB|UFMG - Laboratório de Biologia Molecular e Computacional de Fungos - cessão de equipamentos e toda a infraestrutura de laboratório em ambiente controlado.

7. Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica - EE|UFMG - cessão de equipamentos para testes de caracterização.

8. Ius Natura Consultoria ESG - planejamento estratégico e suporte em legislação ambiental e legislação de mercado para produtos verdes.

O mercado ainda é emergente e os desafios tanto dentro do laboratório quanto na inserção ao mercado são enormes, mas a evolução tecnológica em ritmo exponencial está trazendo novos e rápidos caminhos para o aprimoramento da produção, como a Inteligência artificial aplicada ao aprimoramento de processos. Os próximos passos desta jornada visam o desenvolvimento de uma linha de biomateriais que ofereça versatilidade em cores, densidades e texturas, com propriedades mercadologicamente competitivas em comparação ao poliestireno e polipropileno expandidos, polímeros derivados de petróleo predominantes na indústria automobilística.

O impacto mercadológico imediato é a expansão do mercado de espumas de micélios, por meio dos novos atributos estéticos até então inexplorados neste setor. Pela limitação estética, as espumas fúngicas presentes atualmente no mercado têm sua utilização restrita a revestimentos internos ou proteção para embalagens. Este novo bioproduto conservará os mesmos atributos ambientais, biológicos e mercadológicos das espumas fúngicas atuais, mas com o diferencial de serem esteticamente atrativas, o que expande a possibilidade de novos mercados em substituição aos polímeros derivados de petróleo para o setor da moda, do design, do mobiliário e principalmente o setor automotivo. A nível de propriedade intelectual, será, a nível global, a primeira patente de espumas fúngicas com atributos estéticos atrativos. Na esfera tecnológica, o impacto esperado é o fortalecimento de tecnologias de produção desenvolvidas a partir da ótica interdisciplinar entre a Biologia, o Design e a Engenharia, contribuindo para o protagonismo do Growing Design e outras práticas sustentáveis de progresso tecnológico.

E como um produto desenvolvido dentro do grupo de pesquisa e spin-off Gluon Bio, espera-se que estes novos produtos sejam um propulsores de visibilidade, reconhecimento e investimentos para a nossa spin-off.

REFERÊNCIAS

ALANEME, K. K. et al Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications. **Alexandria Engineering Journal**, v. 83, p. 234–250, 15 nov. 2023.

ANGELIKI KYLILI et al Lignin valorisation: Life Cycle Assessment (LCA) considerations for enabling Circular Bioeconomy. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 42, n. 1, p. 1008–1027, 31 ago. 2023.

APPELS, F. V. W. et al Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. **Materials & Design**, v. 161, p. 64–71, jan. 2019.

ATTIAS, N. et al Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 246, p. 119037, fev. 2020.

BITTING, S. et al Challenges and Opportunities in Scaling up Architectural Applications of Mycelium-Based Materials with Digital Fabrication. **Biomimetics**, v. 7, n. 2, p. 44, 14 abr. 2022.

BMW GROUP. **BMW Group - Sustainability - Our Focus - CO2 Reduction.**

Disponível em:

<<https://www.bmwgroup.com/en/sustainability/our-focus/co2-reduction.html>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

BORRELLE, S. B. et al Predicted Growth in Plastic Waste Exceeds Efforts to Mitigate Plastic Pollution. **Science**, v. 369, n. 6510, p. 1515–1518, 18 set. 2020.

BRUSCATO, C. et al High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust — Sustainable technology for waste reduction. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 225–232, out. 2019.

CAMERE, S.; KARANA, E. Growing materials for product design. Conference Proceedings. In: **2017 International Conference of the Design Research Society Special Interest Group on Experiential Knowledge: Alive. Active. Adaptive**, Eksig 2017. Design Research Society, 19 jun. 2017.

CAMERE, S.; KARANA, E. Fabricating Materials from Living organisms: an Emerging Design Practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 570–584, jun. 2018.

DESHMUKH, S. K.; DESHPANDE, M. V.; SRIDHAR, K. R. **Fungal Biopolymers and Biocomposites**. [s.l.] Springer Nature, 2022.

ELSACKER, E. et al **Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates**. PLOS ONE, v. 14, n. 7, p. e0213954, 22 jul. 2019.

ENVIRONMENT, U. N. **Turning off the Tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy**. Disponível em:

<<https://www.unep.org/resources/turning-off-tap-end-plastic-pollution-create-circular-economy>>. Acesso em: 11 jan. 2024.

FORD, M. C. **Finding Sustainability in surprising places**. Disponível em: <<https://corporate.ford.com/articles/sustainability/agave.html>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

GIROMETTA, C. et al Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. **Sustainability**, v. 11, n. 1, p. 281, 8 jan. 2019.

GROUP, S. **Stellantis está no caminho para alcançar metas sociais e ambientais ousadas**. Disponível em: <<https://www.media.stellantis.com/br-pt/corporate-communications/press/stellantis-esta-no-caminho-para-alcancar-metas-sociais-e-ambientais-ousadas>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

GYAN, P.; KUMAR, A. Digitalization of manufacturing for implanting value, configuring circularity and achieving sustainability. **Journal of Advances in Management Research**, v. Vol. 20, n. 09727981, p. 116–139, 23 jan. 2023.

Introdução à economia circular. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/temas/economia-circular-introducao/visao-geral>>. Acesso em: 18 jan. 2024.

MACLEOD, M. et al The Global Threat from Plastic Pollution. **Science**, v. 373, n. 6550, p. 61–65, 1 jul. 2021.

MANAN, S. et al Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 6, n. 1, p. 1–10, fev. 2021.

MEYER, V. et al Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper. **Fungal Biology and Biotechnology**, v. 7, n. 1, 2 abr. 2020.

MONTALTI, M. **The Growing Lab / Mycelia**. Disponível em: <<https://www.corpuscoli.com/projects/the-growing-lab/>>. Acesso em: 13 jan. 2024.

OSTLE, C. et al The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, 16 abr. 2019.

OXMAN, N. **Material-based design computation**. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1721.1/59192>>. Acesso em: 11 jan. 2024.

PATEL, J. D.; SHARMA, J. M. A REVIEW OF MYCELIUM-BASED BIO-COMPOSITES AND THEIR POSSIBLE APPLICATION IN ARCHITECTURE. **ShodhKosh Journal of Visual and Performing Arts**, v. 4, n. 2SE, 20 dez. 2023.

PRASANTH, S. M. et al Application of biomass derived products in mid-size automotive industries: A review. **Chemosphere**, v. 280, p. 130723, out. 2021.

SHARMA, R.; MALAVIYA, P. Ecosystem services and climate action from a circular bioeconomy perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 175, p. 113164, abr. 2023.

SIERRA, L. A. B. et al Current situation and future perspectives for the use of fungi in the biomaterial industry and proposal for a new classification of fungal-derived materials. **PeerJ Materials Science**, v. 5, p. e31, 29 ago. 2023.

SYDOR, M. et al Fungi in Mycelium-Based Composites: Usage and Recommendations. **Materials**, v. 15, n. 18, p. 6283, 1 jan. 2022.

VAN DEN BRANDHOF, J. G.; WÖSTEN, H. A. B. Risk assessment of fungal materials. **Fungal Biology and Biotechnology**, v. 9, n. 1, 24 fev. 2022.

VANDEN ELSACKER, E. **Mycelium matters - an interdisciplinary exploration of the fabrication and properties of mycelium-based materials**. Disponível em: <<https://researchportal.vub.be/en/publications/715b3fd0-bac5-4dc6-86a5-92264506cd6c>>. Acesso em: 6 jan. 2024.

VAZ JUNIOR, S. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. www.infoteca.cnptia.embrapa.br, 2020.

VOLVO, C. C. **The rise of conscious design - Full report**. Disponível em: <<https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/documentfile/285907/the-rise-of-conscious-design-full-report>>. Acesso em: 31 jan. 2024.

YANG, Z. (JOEY) *et al* Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 7, p. 04017030, jul. 2017.