CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
CEFET MG

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA DE PRODUTOS E PROCESSOS

Sabrina Petrillo Sampaio

PRODUÇÃO DE BIOMATERIAIS USANDO MICÉLIO FÚNGICO E RESÍDUO AGRÍCOLA

Belo Horizonte

2022

Sabrina Petrillo Sampaio

PRODUÇÃO DE BIOMATERIAIS USANDO MICÉLIO FÚNGICO E RESÍDUO AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos do CEFET-MG, na linha de Pesquisa em Sustentabilidade de Processos e Controle Ambiental, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Orientador: Profa. Dr(a). Fernanda Badotti

Co-orientador: Prof. Dr(a). Aline Bruna da Silva

Belo Horizonte

2022

Sampaio, Sabrina Petrillo.
S192p Produção de biomateriais usando micélio fúngico e resíduo agrícola / Sabrina Petrillo Sampaio. - 2022.
75 f. : il., fotos, grafs., tabs.
Orientadora: Fernanda Badotti.
Coorientadora: Aline Bruna da Silva.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, Belo Horizonte, 2022.
Bibliografia.

1. Fungos. 2. Micélio. 3. Biomateriais. 4. Biocompósito. 5. Resíduos agrícolas. I. Badotti, Fernanda. II. Silva, Aline Bruna da. III. Título.

CDD: 579.5

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca - *campus* Nova Suíça - CEFET-MG
Bibliotecária: Deiler Fraga Rabelo - CRB/6-2318

SABRINA PETRILLO SAMPAIO

PRODUÇÃO DE BIOMATERIAIS USANDO MICÉLIO FÚNGICO E RESÍDUO AGRÍCOLA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Produtos e Processos.

Belo Horizonte, 29 de novembro de 2022.

Aprovada pela Banca Examinadora:

Profª. Drª. Fernanda Badotti (Orientadora)

Prof.ª Drª. Aline Bruna da Silva (Coorientadora)

Prof.ª. Drª. Ângela de Mello Ferreira

Prof. Dr. Aristóteles Góes Neto

Dedico este trabalho aos meus filhos, Raphael e Clarice.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a toda minha família que sempre esteve ao meu lado, me apoiando para realização deste sonho, em especial ao meu marido Frederick e aos meus pais Reinaldo e Benedita. Nessa trajetória muitas pessoas me ajudaram e sou grata a cada uma delas.

Um agradecimento especial ao Luz Alba, Ana Pacheli e à Marcella por todo apoio. Agradeço a todos do Laboratório de Biologia Molecular e Computacional de fungos (LBCMF) do Departamento de Microbiologia (ICB/UFMG), não poderia deixar de agradecer também a todos os envolvidos no Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Produtos e Processos (PPGTPP).

Fernanda Badotti e Aline Bruna, obrigada por compartilharem comigo todo conhecimento, esse trabalho não seria possível sem vocês.

“O sucesso é a soma de pequenos esforços repetidos dia após dia.” (Robert Collier)

SAMPAIO, Sabrina Petrillo. **Produção de biomateriais usando micélio fúngico e resíduo agrícola.** 2022. 76p. – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos do CEFET-MG. 2022. Belo Horizonte.

RESUMO

Os materiais derivados de petróleo são utilizados para as mais diversas aplicações, porém o processo de decomposição de grande parte destes é lento, resultando em um grande problema ambiental. Uma alternativa promissora é utilizar biomateriais produzidos a partir de micélios de fungos cultivados em resíduos vegetais (biocompósitos). Esses materiais são biodegradáveis e tem potencial para gerar compostos com propriedades mecânicas diversificadas. O objetivo geral foi desenvolver e analisar um material micocompósito por meio do cultivo dos fungos: *Trametes villosa* e *Ganoderma lucidum* utilizando resíduos de bagaço de cana de açúcar e rejeito de mineração. Os corpos de prova foram caracterizados quanto à densidade, absorção de água e submetidos à análise termogravimétrica, espectroscopia de absorção na região do infravermelho (FTIR), ensaio mecânico de compressão e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A adição do rejeito de mineração favoreceu o aumento da densidade, da absorção de água, e ao melhor desempenho do micélio de ambos os fungos no substrato, como foi observado nos espectros de FTIR e nas imagens de MEV, sem ganho de estabilidade térmica como foi visto na análise termogravimétrica. O ensaio de compressão evidenciou que a adição do rejeito de mineração e o aumento da proporção rejeito/substrato levou a um aumento do modulo de elasticidade e uma variação da resistência à compressão quando comparado ao material contendo apenas o fungo e substrato.

Palavras-chave: Micocompósito; *Trametes villosa*; *Ganoderma lucidum*; Resíduo agrícola.

SAMPAIO, Sabrina Petrillo. **Produção de biomateriais usando micélio fúngico e resíduo agrícola**. 2022. 76p. – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos do CEFET-MG. 2022. Belo Horizonte.

ABSTRACT

Petroleum-based materials are used for the most diverse applications, but the decomposition process of most of them is slow, resulting in a major environmental problem. A promising alternative is to use biomaterials produced from fungal mycelia grown on vegetable waste (biocomposites). These materials are biodegradable and have the potential to generate composites with diverse mechanical properties. The general objective was to develop and analyze a mycocomposite material by cultivating the fungi: *Trametes villosa* and *Ganoderma lucidum* using sugar cane bagasse waste and mining waste. The specimens were characterized as to density, water absorption and submitted to thermogravimetric analysis, infrared absorption spectroscopy (FTIR), mechanical compression test and scanning electron microscopy (SEM). The addition of the mining tailings favored an increase in density, water absorption, and the better performance of the mycelium of both fungi on the substrate, as observed in the FTIR spectra and SEM images, without gaining thermal stability as seen in the thermogravimetric analysis. The compression test showed that the addition of the mining tailings and the increase in the tailings/substrate ratio led to an increase in the modulus of elasticity and a variation in compressive strength when compared to the material containing only the fungus and substrate.

***Keywords*:** Mycocomposite; Trametes *villosa*; *Ganoderma lucidum*; Agricultural waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de uma seção transversal do material biocompósito...17
Figura 2 - Representação esquemática da fisiologia micelial em diferentes escalas.....22
Figura 3 - Cronologia da mineração no Brasil: do seu surgimento até os dias atuais.....25
Figura 4 - Fluxograma das etapas do trabalho.....27
Figura 5 - Sequência de peneiras utilizadas para selecionar o tamanho dos fragmentos de resíduo agroindustrial utilizado neste estudo (bagaço de cana).....30
Figura 6 - Frações de bagaço selecionados após peneiramento.....39
Figura 7 - Avaliação da medida indireta da produção de enzimas ligninolíticas pelos fungos *Trametes villosa* CCMB 561, *Ganoderma lucidum* CCMB601, Ganoderma sp. DHCR 379..42
Figura 8 - Crescimento dos fungos em rejeito no terceiro dia de incubação.....43
Figura 9 - Crescimento dos fungos em rejeito no quinto dia de incubação.....44
Figura 10 - Crescimento dos fungos em rejeito no sétimo dia de incubação.....45
Figura 11 - Representação das etapas de crescimento do micélio dos fungos na presença do bagaço de cana de açúcar e rejeito de mineração.....47
Figura 12 - Imagens de MEV da estrutura interna próxima ao centro do compósito baseado em micélio fúngico.....59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Esquema de produção dos corpos de prova.....33
Tabela 2 - A evolução do raio de descoloramento durante a realização do teste.....40
Tabela 3 - Valores de densidade para as amostras de corpos de prova T1, T2, T3 para os dois fungos estudados, *Trametes villosa CCMB 561 e Ganoderma lucidum 601*.....52
Tabela 4 - Ensaio de absorção de água realizado para os corpos de prova T1, T2, T3 produzidos com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.....54
Tabela 5 - Tabela de valores obtidos por TGA e DTG dos corpos de prova T1 561, T2 561, T3 561 (produzidas com *Trametes villosa*) e T1 601, T2 601 e T3 601 (produzidas com *Ganoderma lucidum*).....56
Tabela 6 - Resultados do diâmetro médio do filamento de hifas para os corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes* villosa.....60
Tabela 7 - Tabela de valores obtidos para o módulo de elasticidade dos corpos de prova T1, T2, T3 produzidos com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.....67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Difratograma de raios X do rejeito de mineração utilizado nos compósitos.....49
Gráfico 2 - Curva granulométrica obtida pelo método de granulometria a laser para o rejeito de mineração.....50
Gráfico 3 - Comparação entre os valores obtidos de densidade para os corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes* villosa.....52
Gráfico 4 - Curvas de absorção de água para os corpos de prova contendo (a) o fungo 561 (*Trametes villosa*) e (b) fungo 601 (*Ganoderma lucidum*).....55
Gráfico 5 - Análise termogravimétrica dos corpos de prova T1 561, T2 561, T3 561 (produzidas com *Trametes villosa*) e T1 601, T2 601 e T3 601 (produzidas com *Ganoderma lucidum*).....57
Gráfico 6 - Comparação entre os valores obtidos de diâmetro das hifas para os corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.....61
Gráfico 7 - Espectros vibracionais infravermelho do substrato isolado (bagaço de cana de açúcar), aditivo (rejeito de mineração) e dos corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.....62
Gráfico 8 - Análise da resistência compressiva das réplicas no ensaio de compressão para os corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes* villosa.....65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
Lac	Lacase
LBCMF	Laboratório de Biologia Molecular e Computacional de fungos
LiP	Peroxidase de Lignina
MnP	Peroxidase de Manganês
RBBR	Remazol Brilliant Blue R
RM	Rejeito de mineração
TGA	Termogravimetria
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
DRX	Difratometria de raios X
FTIR	Espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....14
2 OBJETIVOS.....15
2.1 OBJETIVO GERAL.....15
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....15
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....16
3.1 COMPÓSITOS E BIOCOMPÓSITOS 16
3.2 SUBSTRATO – RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS.....20
3.3 FUNGOS.....22
3.4 REJEITOS DE MINERAÇÃO..... 24
4 MATERIAIS E MÉTODOS..... 27
4.1. AQUISIÇÃO, PRESERVAÇÃO E MANUTENÇÃO DA LINHAGEM FÚNGICA..... 30
4.2. OBTENÇÃO E PREPARO DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS (BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR).....30
4.3. TESTE QUALITATIVO PARA AVALIAR OS FUNGOS COM MAIOR CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENZIMAS PEROXIDASES..... 31
4.4. TESTE PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE REJEITO DE MELHOR CRESCIMENTO DOS FUNGOS.....31
4.4.1 Preparo do inóculo em grão de trigo.....32
4.5 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA..... 33
4.6 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL..... 35
4.6.1 Caracterização da densidade.....35
4.6.2 Ensaio de absorção de água.....35
4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....35
4.7.1 CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE.....36
4.7.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....36
4.7.3 ANÁLISE TÉRMICA POR TERMOGRAVIMETRIA (TGA).....36
4.7.4 ANÁLISE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....37
4.7.5 ANÁLISE ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....37
4.7.6 ENSAIO DE COMPRESSÃO.....37

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....39
5.1 PREPARO DOS RESÍDUOS AGROINDÚSTRIAL (BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR).....39
5.2 TESTE QUALITATIVO PARA AVALIAR OS FUNGOS COM MAIOR CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENZIMAS PEROXIDASES.....40
5.3 TESTE PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE REJEITO DE MELHOR CRESCIMENTO DOS FUNGOS.....42
5.4 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA.....46
5.5 CARACTERIZAÇÃO DA DENSIDADE.....49
5.5.1 Difração de raios x (DRX).....49
5.5.2 Granulometria a laser.....50
5.6 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....51
5.6.1 Caracterização da densidade.....51
5.6.2 Ensaio de absorção de água.....54
5.6.3 Análise termogravimétrica (TGA).....56
5.6.4 Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....58
5.6.5 Análise espectroscopia no infravermelho por transformada de fourier (FTIR).....62
5.6.6 Ensaio de compressão.....64
6 CONCLUSÃO.....70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....71

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Atualmente, existe uma grande quantidade de materiais produzidos a partir de fontes não renováveis, como o petróleo. Estes materiais compõe uma gama enorme de utilitários, tais como eletrodomésticos, *smartphones*, televisores, vestuário, automóveis, dentre muitos outros. O descarte e reciclagem desses materiais é difícil devido à alta complexidade de composição, gerando assim, um grande problema ambiental, pois o acúmulo de elevadas quantidades de resíduos pode provocar poluição de rios, mares e solos. Desta forma, existe uma crescente e urgente demanda por materiais alternativos, de fácil degradação, e que atendam às características químicas, físicas e mecânicas dos materiais existentes.

Os micocompósitos são materiais obtidos pelo crescimento de fungos utilizando matéria orgânica, especialmente resíduos agrícolas como substrato, e apresentam-se como uma promissora alternativa ao uso de materiais derivados de petróleo. São materiais contemporâneos, e apresentam amplas possibilidades de utilização, tal como na indústria têxtil, embalagens, isolamento térmico e acústico, como material de decoração e mobiliário. Contudo, o uso desses materiais alternativos é ainda irrelevante quando comparados aos derivados do petróleo, e uma das barreiras encontradas está relacionada às propriedades desses materiais, que precisam assemelhar-se a dos materiais existentes para que possam representar um substituto que atenda às necessidades de cada aplicação. Grande parte dos materiais produzidos a partir de fungos é feito por empresas e o conhecimento acerca do processo de produção, na maioria das vezes, está protegido por patentes. É sabido que a espécie (até mesmo linhagem) de fungo utilizada, bem como o tipo de resíduo agrícola e as condições utilizadas para o cultivo do fungo, tal como temperatura e tempo de cultivo, afetam significativamente as propriedades mecânicas do material produzido. Desta forma, é muito importante que diferentes processos sejam testados para que seja possível relacionar o processo de produção com as propriedades dos biocompósitos, e assim, avaliar e ampliar as possibilidades de uso para esses materiais.

Neste trabalho, os fungos *Trametes villosa* e *Ganoderma lucidum* foram cultivados em bagaço de cana de açúcar utilizando tempo de incubação e temperaturas previamente otimizados, o efeito da adição de rejeito de mineração ao crescimento também foi investigado, assim como as propriedades mecânicas dos materiais produzidos, com isso, os corpos de prova foram avaliados e os resultados são apresentados e discutidos a seguir.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho foi desenvolver e analisar um material micocompósito por meio do cultivo dos fungos: *Trametes villosa* (CCMB 561) e *Ganoderma lucidum* (CCMB601) utilizando resíduos de bagaço de cana de açúcar e rejeito de mineração.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar um fungo entre *Ganoderma lucidum*, *Ganoderma sp.* DHCR 379 que produz micélio com potencial para agregar a microestrutura do componente como controle positivo;
- Produzir corpos de provas (material micocompósito) com e sem adição de rejeito de mineração;
- Realizar ensaios mecânicos de compressão, densidade, análise termogravimétrica, absorção de água, espectroscopia de absorção na região do infravermelho e microscopia eletrônica de varredura;
- Analisar a influência da adição de rejeito de mineração nas propriedades físicas e químicas do material produzido.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A indústria da construção sofreu uma pressão significativa na última década, pois os métodos de produção de materiais de construção são limitados e a demanda da população global está aumentando. A produção de materiais de construção tradicionais (por exemplo, aço, concreto) consome energia significativa, eles poluem nosso meio ambiente e isso pode ser medido e rastreado pelo carbono incorporado, limitando sua produção e uso massivos. Ao mesmo tempo, o rápido crescimento da população global leva ao aumento do consumo anual de produtos agrícolas, o que gera mais subprodutos (por exemplo, casca de arroz, talos de algodão e palha), com a maioria deles sendo rastreados como resíduos puramente agrícolas descartados ou queimados, gerando dióxido de carbono, partículas atmosféricas e outros gases de efeito estufa (YANG; DAEKWON; QIN, 2021).

Conforme os autores supracitados os subprodutos agrícolas também têm sido parcialmente usados como aditivos para fertilizantes, camas para animais e materiais de construção de baixa qualidade para infraestruturas (por exemplo, elementos de tijolo e concreto verde para prédios baixos, materiais de isolamento, painéis de partículas para aplicações não estruturais) e enchimentos para construção de estradas (por exemplo, a estrada local de betume que contém cinzas de casca de arroz pode suportar uma carga maior e ter resistência à água). Contudo, identifica-se que há outros materiais que apresentam alta resistência e não poluem tanto e são melhores ao meio ambiente, como se apresenta a seguir.

3.1 COMPÓSITO E BIOCOMPÓSITO

De acordo com Callister e Rethwisch (2012) compósitos são combinações de dois ou mais materiais os quais possuem propriedades físicas ou químicas diferentes, que quando agrupados constroem um novo material com novas propriedades. Desta forma, os materiais têm fases constituídas por estruturas moleculares e propriedades diferentes que quando unidas busca-se a melhorias de suas características tais como tração, flexão, dureza, impacto e resistência térmica (SMITH, 2013).

Grande volume de materiais compósitos apresenta estruturas simples, sendo constituídos de duas fases, uma denominada matriz, que é contínua, e outra, chamada de fase dispersa. As propriedades dos compósitos são resultantes de propriedades das fases que os

constituem, de suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

Dentro do domínio dos materiais de base biológica, os compósitos constituídos por uma matriz dúctil e reforço de alta resistência oferecem alto desempenho a baixo custo e grande liberdade na concepção de um material para uma aplicação específica (MALLICK, 2008). Embora muitos compósitos possuam um reforço natural, a matriz é frequentemente baseada em produtos petroquímicos (FARUK *et al*., 2012; KORONIS; SILVA; FONTUL, 2013; LA MANTIA; MORREALE, 2011). Uma alternativa renovável para essas matrizes é o estado vegetativo de um fungo, o micélio. Tal matriz é totalmente de base biológica e pode ser produzida a baixo custo.

O material biocompósito tem uma estrutura em camadas formando uma espécie de sanduíche, com ligação na parte superior e inferior por meio de hifas que crescem em torno de todo o substrato, entrelaçando as partículas de fibras constituintes do substrato conforme a figura 1.

Figura 1 - Representação esquemática de uma seção transversal do material biocompósito que possui um núcleo de fibras agrícolas como material de reforço e o conglomerado do tecido de superfície e hifas de micélio como a matriz de ligação. Fonte: Adaptado de Ziegler *et al.* (2016).

O material de ligação, parte do meio, conforme apresentado na figura 1, pode ser composto por diversos substratos diferentes, desde que o material seja rico em celulose, o que permite que o fungo cresça através dele. A diferença fundamental entre fungos e outros organismos é que os fungos podem quebrar a celulose em glicose. Isso significa que em ambientes ricos em celulose os fungos podem crescer rapidamente, enquanto outros organismos não. Portanto, é prático usar materiais ricos em celulose no cultivo de fungos para evitar a contaminação por outros organismos, sendo assim, resíduos agroindustriais são fortes candidatos para compor as camadas intermediárias.

O micélio é inativado por tratamento térmico antes que o produto esteja pronto para uso, tornando-o seguro para ser aplicado até mesmo como material de embalagem (ZIEGLER

et al., 2016; HOLT *et al*., 2012).

O processo de fabricação de material biocompósito pode ser projetado para gerar um conjunto de propriedades desejáveis. Por exemplo, o tipo de fibra vegetal utilizada, a distribuição de tamanho das fibras que compõe o substrato, a densidade dos compostos utilizados, a cepa de fungo, as condições de cultivo e o tipo de substrato podem afetar as propriedades do material biocompósito. Um ponto favorável para produção do material biocompósito está relacionado ao fato dos fungos apresentarem crescimento rápido.

As aplicações potenciais para materiais compósitos fúngicos que foram discutidos até agora são tão diversas quanto disruptivas - em breve material de embalagem, isolamento térmico, isolamento acústico, material de construção e couro podem ser produzidos por fungos filamentosos do filo Basidiomycota (POHL *et al*., 2022).

No estudo realizado Pelletier *et al.* (2013) foi analisado o uso de material a base de micélio de fungo do filo Basidiomicetos cultivado em substratos semi-hidrofóbicos, como subprodutos de algodão, folhas, gravetos e carrapichos de algodão e outros subprodutos agrícolas de baixo custo, como erva-doce, palha de arroz, talos de sorgo, palha de linho, kenaf e cânhamo em aplicações de absorção acústica. Desta forma é possível substituir materiais de recursos não renováveis, como isopor e espumas de poliuretano.

Já em um novo estudo de Jones (2017) os basidiomicetos que crescem em subprodutos agrícolas (palha de arroz, medula de cânhamo, fibra de kenaf, capim, fibra de sorgo, fibra de algodão, palha de linho) apresentam propriedades de absorção acústica promissoras para aplicações automotivas, amortecendo as frequências de ruído dominantes nas estradas entre 500 Hz a 1600 Hz (caminhões grandes) e 800 Hz a 1600 Hz (automóveis de consumo). Mesmo misturas de substratos de baixo desempenho rendem melhor que 70-75% de absorção na frequência de pico de interesse (1000 Hz) e exibem propriedades acústicas superiores tanto para materiais de construção padrão quanto para placas de forro à base de fibra.

Outra aplicação para os materiais produzidos utilizando-se os fungos são as embalagens, sendo considerado uma alternativa ao plástico convencional, apresenta custo competitivo em relação a quaisquer outras espumas padrão. A espuma de poliestireno, que tem componente derivados de petróleo, é um material de embalagem de destaque que não é biodegradável nem compostável. A incorporação de materiais à base de micélio para embalagens pode ajudar a reduzir o consumo de espuma de poliestireno aparecendo como alternativa de embalagens ecológicas, aumentando assim a sustentabilidade, sem

comprometer o custo ou o desempenho (ABHIJITHU; ASHOK; REJEESHB, 2017).

A pesquisa e o desenvolvimento de materiais à base de fungos é um esforço interdisciplinar que não é trivial. Visa uma compreensão holística e otimização racional de todos os aspectos biológicos e tecnológicos que impactam as propriedades finais do material. De acordo com Meyer (2022) as características mecânicas, físicas, químicas, térmicas, construtivas, sensuais, estéticas ou arquitetônicas são claramente dependentes da composição genética do organismo produtor de fungos usado (por exemplo, seu perfil de crescimento, padrão de ramificação, hidrofobicidade, arquitetura da parede celular e enzimática equipamento), as propriedades dos substratos agrícolas e florestais (por exemplo, forma, tamanho, textura e composição molecular) e os procedimentos de fabricação e processamento (por exemplo, pré-tratamento do substrato, condições de cultivo e pós-tratamento, como secagem, prensagem ou Revestimento).

Embora os compósitos à base de micélio apresentem vantagens por sua mecânica, leveza e muitas características ecologicamente corretas, eles apresentam limitações e desafios para suas aplicações em larga escala. Por exemplo, como biomaterial, sua produção é menos padronizada do que os materiais convencionais de engenharia, como aço, cimento e polímero, e não está claro como personalizar os tipos de substratos para certas espécies de fungos para maximizar o rendimento de micélio e para otimizar as propriedades mecânicas. No entanto, uma vez que existem mais de um milhão de espécies testar a microestrutura e a mecânica de cada um deles é extremamente difícil e podemos precisar investigar a relação estrutura-mecânica de diferentes classes de fungos (por tipo de podridão, tipo de hifa, gene, etc.) espécies de compósitos elásticos com a melhor mecânica (BLACKWELL, 2011). Além disso, ao contrário das espumas de polímero, os biocompósitos à base de micélio não podem ser produzidos massivamente em pouco tempo por máquinas, pois o crescimento do micélio precisa de cerca de 2 semanas ou mais. É importante controlar automaticamente os fatores de crescimento, incluindo temperatura, umidade, nutrição fornecida e luz dentro de um ambiente de incubação sem o uso direto de mão de obra humana durante seu crescimento. Também não está claro como cada um de seus blocos constituintes contribui para sua interface com as fibras de madeira e, portanto, afeta a integridade da rede fibrosa do compósito. Essas limitações são cruciais antes de fornecer o material ao arquiteto e existem aplicações industriais mais amplas (YANG; DAEKWON; QIN, 2021).

3.2 SUBSTRATOS – RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS

Resíduos agrícolas podem ser utilizados como substratos no desenvolvimento de micocompósitos, desta forma, como o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar [1], seria uma forma sustentável de agregar valor aos resíduos provenientes desse material. De forma semelhante, a indústria de mineração produz enorme quantidade de rejeitos, pedras e minerais de baixo valor que são usualmente acumulados no ambiente[2] e que também apresentam potencial para serem usados nos micocompósitos agregando novas propriedades mecânicas ao material. (HANEEF *et al*., 2016).

Em virtude da grande geração de resíduos produzidos pela sociedade atual torna-se essencial repensar os materiais provenientes deste lixo para que não causem danos que comprometam o futuro do planeta. Este estudo tem por objetivo buscar alternativas que gerem valor agregado aos resíduos agrícolas e de mineração no desenvolvimento de micocompósitos.

As agroindústrias assim como as atividades agrícolas no campo geram uma enorme quantidade de resíduos que se acumulam no meio ambiente. Estes materiais são ricos em celulose e representam uma fonte de recursos renováveis de biomassa (GIROMETTA, 2019).

No geral, pode-se dizer que existe uma grande variedade de substratos a serem usados para o crescimento de organismos fúngicos, pois estes microrganismos são versáteis podendo utilizar vários tipos de substratos e fontes de carbono. A abundância e composição dos substratos disponíveis difere regionalmente, o que pode interferir nas propriedades do micélio, devido aos tipos de substâncias que foram digeridas pelos fungos (CERIMI *et al*., 2019).

Compreende-se que existe um leque de substratos usados variando entre aqueles que têm uma composição definida com certos componentes, e substratos complexos cuja origem, mas não a composição química, é definida. Além disso, existem substratos que não estão completamente degradados e, portanto, são necessários para as características ou funções do material. Em princípio, os requisitos para o substrato são uma ou mais fontes de carboidratos, nitrogênio e fósforo dissolvidos (CERIMI *et al*., 2019).

A maioria dos substratos contém celulose, lignina ou ambos, portanto, deve haver

---

[1] https://www.investe.sp.gov.br/setores-de-negocios/agronegocios/cana-de-acucar/referência

[2] https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf

água suficiente disponível. Exemplos de substratos usados para crescimento de fungos são a palha e farelo de trigo, palha de milho, o bagaço de cana, substratos contendo madeira, como serragem ou aparas. Os substratos de lã, cânhamo ou resíduos da produção de seda que também podem ser considerados. Compreende-se que basicamente, todos os materiais orgânicos e não tóxicos que permanecem como resíduos agrícolas e industriais de outros ramos de produção podem ser aplicados como matéria-prima para substratos e como esses materiais contêm grandes quantidades de celulose, eles são predestinados para o metabolismo celulolítico de organismos fúngicos (CERIMI *et al.*, 2019).

Diante das características básicas de um substrato, Lino (2015) considera que o bagaço da cana de açúcar é um substrato de grande potencial no Brasil, uma vez que o país é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido por Índia e Austrália. Planta-se cana no Centro-Sul e no Norte-Nordeste do país, o que permite dois períodos de safra no ano, sendo assim tem-se um grande volume de resíduo que é abundante fonte de material lignocelulósico. Identifica-se que o bagaço da cana de açúcar é um resíduo fibroso da extração do caldo pelas moendas. A quantidade produzida depende do teor de fibra da cana processada, apresentando, em média, 46% de fibra e 50% de umidade. Compreende-se que pela proporção em que é produzido e devido à sua composição, o bagaço constitui-se em um dos mais importantes subprodutos para a indústria sucroalcooleira. Suas principais aplicações são: combustível para caldeira, produção de celulose e na alimentação de gado confinado.

A composição química do bagaço apresenta algumas variações de acordo com a variedade da cana e a localização geográfica de cultivo. Segundo Lino (2015) os principais componentes macromoleculares, são celulose que representa 41 a 44% do bagaço, polioses (hemiceluloses) que representam 25 a 27% e lignina representando de 20 a 22%. O restante, cerca de 10%, são componentes minoritários de baixo peso molecular, extrativos e substâncias minerais.

3.3 FUNGOS

Os fungos prosperam decompondo e consumindo plantas mortas, quebrando a celulose, a lignina e outros açúcares da planta, reorganizando essas moléculas em sua própria biomassa para crescer. Sua parede celular é protegida por cadeias de quitina e glucanos, que, como celulose e queratina, são polímeros naturalmente formadores encontrados nos tecidos

orgânicos mais resistentes. A quitina é o mesmo ingrediente que cria os exoesqueletos duráveis e flexíveis de insetos e mariscos (MEYER *et al*., 2020).

No reino Fungi, o filo Basidiomycota tem sido utilizado em várias pesquisas para o desenvolvimento de micocompósitos. Parte desses fungos são conhecidos por sua grande capacidade de colonizar extensas áreas na natureza (APPELS *et al*., 2019). Na figura 2 é apresentada a estrutura micelar de um fungo de forma detalhada.

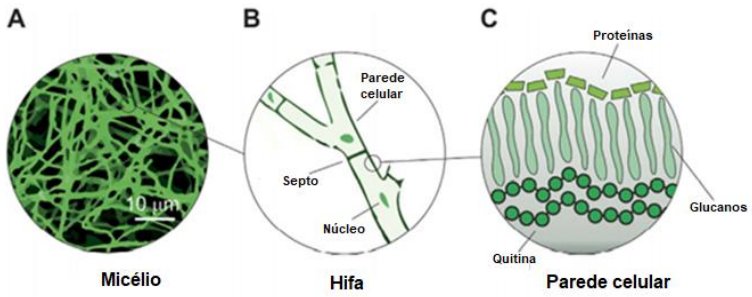


Figura 2 - Representação esquemática da fisiologia micelial em diferentes escalas. (A) Imagem de microscopia óptica de um filme de micélio mostrando uma rede ramificada de microfilamentos (hifas). (B) Representação esquemática de uma hifa formada por células separadas por paredes cruzadas (septos), todas encerradas dentro de uma parede celular. (C) Representação esquemática da parede celular que é composta por uma camada de quitina na membrana celular, uma camada de glucanos (cuja composição varia entre as espécies) e uma camada de proteínas na superfície. Fonte: Adaptado de Haneef *et al.* (2017a).

Os fungos filamentosos são invisíveis e visíveis. O diâmetro das hifas fúngicas varia de 2 a 10 µm, e um micélio fúngico consiste em uma rede de hifas de mm a cm de comprimento. Os micélios de fungos formadores de cogumelos podem colonizar grandes áreas de superfície, como ilustrado por um indivíduo do cogumelo do melArmillaria bulbosa (cogumelo de mel de nome comum em inglês eHallimasch em alemão) que colonizou > 1000 hectares de solo florestal, tornando-se o maior e mais antigo organismo da Terra (MEYER *et al.*, 2020).

Compreende-se que o micélio, a parte vegetativa inferior dos fungos. Há uma relação simbiótica entre o micélio e os materiais que o alimentam, com isso, se forma uma rede emaranhada de fibras ramificadas. Constituído por células alongadas, os filamentos fibrosos de micélio, recebem o nome de hifas (HANEEF *et al.*, 2017a). Durante a colonização de substratos, as hifas unem as partículas orgânicas, enquanto as degradam simultaneamente. Obtém-se um material compósito, constituído por uma massa de substrato orgânico unido

pela rede de hifas, por inativação do fungo antes da degradação do substrato (por exemplo, por secagem ou por inativação pelo calor). Compreende-se que os materiais fúngicos puros são obtidos pela degradação completa do substrato ou pela remoção da pele fúngica do substrato. Tanto o micélio puro quanto o composto podem ser usados para diferentes aplicações (MEYER *et al.,* 2020).

A eficiência de colonização e formação de biomassa é determinada pela composição e propriedades físicas do substrato, pelas condições ambientais de crescimento (temperatura, umidade e pH) e pela composição genética do fungo. (MEYER *et al.,* 2020; YANG; DAEKWON; QIN, 2021).

Dada à necessidade urgente de reduzir a emissão global de dióxido de carbono e a poluição plástica, a pressão para inovar é realmente alta. Nos últimos 5 anos, a capacidade do micélio fúngico não apenas digerir, mas também ligar e conectar partículas soltas à base de plantas em materiais compósitos mais firmes levou a um aumento substancial de publicações que foram pioneiras no processo de fabricação e que descreveram algumas características de materiais à base de micélio (POHL *et al.,* 2022).

As espécies de fungos escolhidas no processo de fabricação do material influenciam significativamente a colonização e as propriedades físico-mecânicas do biocompósito final. Até 2018, apenas cerca de 9 (nove) espécies de fungos tinham sido identificadas para utilização em biocompósitos na literatura (CERIMI *et al.,* 2019). A partir dessas espécies de fungos, a *Ganoderma lucidum* e o *Pleurotus ostreatus* foram considerados as mais comuns.

Segunda a revisão bibliográfica realizada por Attias *et al.* (2020), as espécies mais encontradas são da divisão Basidiomycota, que tem como característica principal possuir hifas. As hifas são estruturas que podem espalhar em um nível nano, através de conexões para reprodução vegetativa e transferência de nutrientes, e penetração das cavidades em um nível microscópico, desta forma o micélio fornece propriedades estruturais de ligação para a mistura composta de resíduo agrícola para a fabricação do micocompósito.

Compreende-se que os Basidiomicetos de podridão branca são os organismos que decompõem a lignina de forma mais eficiente. Neste contexto, o *Trametes villosa* é uma espécie de fungo promissora para a produção de enzimas ligninolíticas apresentando-se como um microrganismo em potencial na produção de biomateriais. Trata-se também de um fungo muito comum no semiárido brasileiro e por ser um bom produtor de enzimas ligninolíticas: Lacase (Lac), Peroxidase de Manganês (MnP) e Peroxidase de Lignina (LiP), evidencia seu

alto potencial para aplicações biotecnológicas, enquanto outros fungos de decomposição da lignina não produzem as três enzimas ligninolíticas simultaneamente o que é um ponto altamente desejável para aplicações biotecnológicas (FERREIRA *et al.*, 2018).

3.4 REJEITOS DE MINERAÇÃO

Durante um longo período, a extração de substâncias minerais ocorreu através de técnicas e ferramentas arcaicas. A geração de rejeitos e os problemas decorrentes de sua disposição no meio ambiente não eram consideradas significativas, sendo uma prática comum o descarte diretamente na natureza. Isto aconteceu no primórdio da mineração no Brasil, há cerca de 300 anos, sendo que o ouro e posteriormente o diamante, eram as principais tipologias minerais extraídas. A figura 3 representa uma cronologia simplificada da mineração no Brasil desde a chegada dos portugueses (GOMES, 2017).

Figura 3 - Cronologia da mineração no Brasil: do seu surgimento até os dias atuais. Fonte:https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOSAN9QQC/1/anacl_udiagomes_disserta__ofinal.pdf

De acordo com o documento Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração, do IBRAM (2016), a Mineração é um conjunto de atividades designadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar ou beneficiar e transformar recursos minerais de forma a torná-los benefícios econômicos e sociais. No cenário mundial atual, a atividade mineradora exerce papel importante contribuindo para o desenvolvimento econômico dos países e fornecendo insumos para a manutenção do nível de vida e avanço das sociedades modernas (BACCO, 2020).

Como consequência do amplo processo de mineração no mundo temos o aumento da geração de rejeitos, o que resultou na necessidade de removê-los das áreas de produção para outros locais, tornando necessária a construção de estruturas de contenção.

Durante o processo de beneficiamento dos minerais, dois tipos de resíduos (subprodutos da extração sem valor comercial) são gerados: Materiais estéreis, compostos por

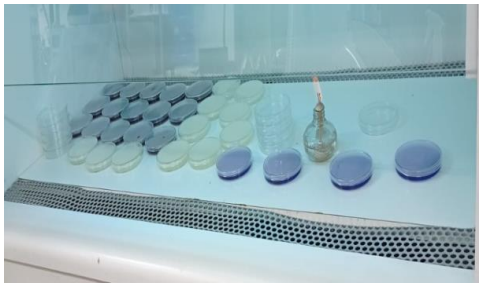
fragmentos grosseiros de rocha (com alguns centímetros de tamanho) e resíduos da lavra (exploração da jazida mineral). Além dos resíduos, são gerados rejeitos, produtos do beneficiamento mineral, que são mais finos (de alguns milímetros a frações de milímetros), e são, em muitas empresas, dispostos em barragens de rejeitos. O conteúdo dos rejeitos pode variar segundo o tipo de minério que está sendo explorado (IBRAM, 2016). Por exemplo, segundo Pereira (2019) na região de Minas Gerais a composição do rejeito da flotação (processo de beneficiamento) é essencialmente quartzo, argilominerais e minerais portadores de ferro, como hematita, magnetita e goetita. Existe ainda, nos rejeitos uma parcela de produtos químicos usados no beneficiamento.

Segundo o documento de Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração do IBRAM (2016), existe a necessidade constante de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação que proponham novos usos para os rejeitos gerados pela exploração de minérios. Dentre os destinos propostos está a fabricação de insumos para a construção civil, como blocos de pavimentação e alvenaria. Esta é uma aplicação altamente sustentável, uma vez que a construção civil também é responsável pelo alto consumo de recursos não renováveis (FRANCO *et al.*, 2014).

Os recentes estudos e projetos de empresas de mineração sobre a redução da geração de rejeitos tem o grande potencial de contribuir em redução significativa os volumes de rejeitos a serem dispostos nas barragens.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado com a aquisição, preservação e manutenção da linhagem fúngica, em seguida foi feito a obtenção e preparo dos resíduos agroindustriais (bagaço de cana de açúcar), seguido pelo teste qualitativo para avaliar os fungos com maior capacidade de produção de enzimas peroxidases e depois foi feito o teste para determinação da quantidade de rejeito de melhor crescimento dos fungos. Após essas etapas foi feito o preparo dos corpos de provas seguindo seis etapas e em seguida foi realizado a caracterização deste material. O fluxograma abaixo (Figura 4) exemplifica essas etapas e os itens posteriores descrevem cada uma.



Preparo Corpo de Prova

A - Preparo do inóculo em grão de trigo

B - Higienizar os moldes e autoclavar bases e tampas

C - Pesar, umedecer e autoclavar individualmente os componentes de cada corpo de prova

D – Montagem dos corpos de prova

E - Secagem

F- Nomenclatura utilizada para os corpos de prova

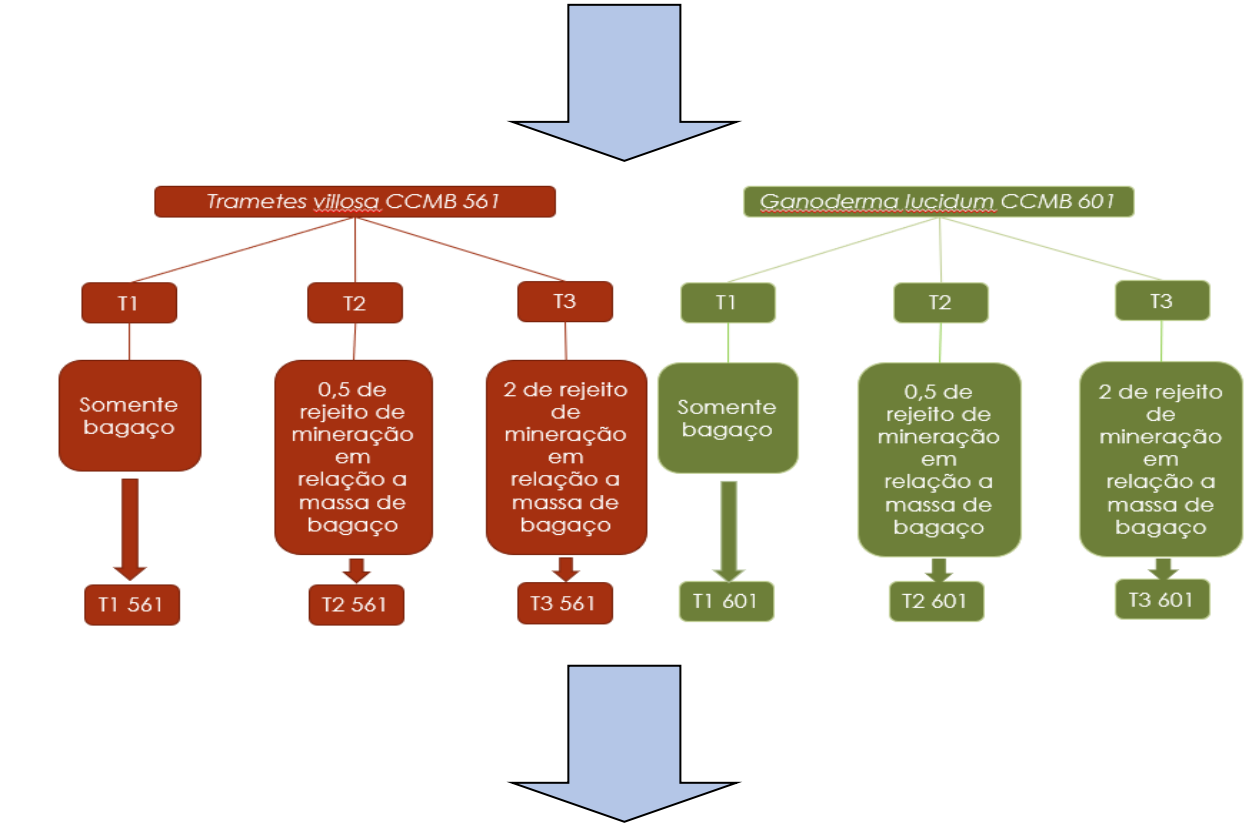


Figura 4 - Fluxograma das etapas do trabalho.

Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

4.1. AQUISIÇÃO, PRESERVAÇÃO E MANUTENÇÃO DA LINHAGEM FÚNGICA

Três isolados fúngicos foram utilizadas neste estudo: *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (CCMB 601), *Ganoderma sp. 1* - DHCR (CCMB 379) e *Trametes villosa* (CCMB 561). Os isolados estão depositados no herbário da Universidade Estadual de Feira de Santana (HUEFS) e na Coleção de Culturas de Microrganismos da Bahia também na Universidade Estadual de Feira de Santana (CCMB -UEFS).

A preservação das linhagens foi realizada adicionando-se 5 *plugs* de micélio (0,5 cm Ø) em frascos de vidro autoclavados contendo água destilada estéril, conforme o método adotado por Castellani (ARIFIN; YUSUF, 2013). Os fungos foram reativados em meio de cultura a base de Batata-Dextrose-Ágar (BDA), incubados em estufa do tipo BOD a 30 ºC na ausência de luz (MENEZES *et al.,* 2016).

4.2. OBTENÇÃO E PREPARO DOS RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS (BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR)

O resíduo escolhido para este trabalho foi o bagaço de cana de açúcar, em função de ser abundante, barato e amplamente disponível no Brasil, e especialmente em Minas Gerais. O bagaço utilizado foi cedido por um alambique da região de Itabirito, MG.

O preparo do substrato consistiu na secagem durante 07 (sete) dias em temperatura de 28°C (+/- 2°C), seguida da moagem, realizada em moinho de facas Thomas Wiley. Após esse processo, foi realizada a seleção da granulometria por peneiramento com vibração utilizando três peneiras com as seguintes especificações: (i) Peneira 1 (topo) de abertura de 12,5mm; (ii) peneira 2 de abertura de 9,5mm; e (iii) peneira 3 de abertura de 4,75mm (Figura 5).

Figura 5 - Sequência de peneiras utilizadas para selecionar o tamanho dos fragmentos de resíduo agroindustrial utilizado neste estudo (bagaço de cana). Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

A partir da seleção da granulometria, descartaram-se os fragmentos maiores que 12,5mm (retidos na primeira peneira). Os demais foram armazenados em ambiente seco a temperatura ambiente e utilizados nas etapas experimentais seguintes.

4.3. TESTE QUALITATIVO PARA AVALIAR OS FUNGOS COM MAIOR CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENZIMAS PEROXIDASES.

Este teste teve como objetivo selecionar dois fungos para serem utilizados na produção de corpos de prova a serem avaliados em relação às propriedades mecânicas. A avaliação consistiu em determinar a capacidade dos isolados fúngicos em promover a descoloração do corante *Remazol Brilliant Blue R* (RBBR), um indicativo da produção de peroxidases degradadoras de lignina.

Os isolados fúngicos foram previamente ativados como descrito no item 3.1. Para o preparo do meio pesou-se, em balança analítica, 9 gramas de bagaço de cana de açúcar com granulometria inferior a 4,75 mm, 9 gramas de agar-agar e 0,09 gramas do corante *Remazol Brilliant Blue R* (RBBR). Em seguida, foram transferidos para o erlenmeyer de 1000 mL e adicionou-se 450 mL de água destilada. O erlenmeyer foi fechado, agitado e levado à autoclave por 20 minutos à temperatura de 120°C. Após a autoclavagem, o meio foi distribuído em placas de Petri com capacidade de 25 mL dentro do fluxo laminar para não ocorrer contaminação.

Após a solidificação dos meios, um plug (pequeno fragmento) do cultivo dos fungos foi inoculado no centro de cada placa de Petri em triplicata, totalizando 9 cultivos. Três placas não foram inoculadas, servindo como controle negativo, com o objetivo de avaliar possíveis contaminações. Todas as placas foram identificadas, mantidas em estufa a 30°C e protegidas de luz.

As leituras dos raios de inibição foram realizadas medindo com uma régua no terceiro, quinto e sétimo dia após a inoculação. Todo o procedimento de inoculação e leitura foi realizado próximo à chama, dentro do fluxo laminar.

4.4. TESTE PARA DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE REJEITO DE MELHOR CRESCIMENTO DOS FUNGOS

O presente teste tem por objetivo avaliar de forma qualitativa o crescimento do micélio dos três fungos estudados em meio compostos de agar-agar, bagaço e rejeito, com concentração de rejeito variadas.

O Rejeito de mineração (RM) utilizado foi cedido pelo Laboratório de Química Inorgânica do Departamento de Química (UFMG). Para o teste preparou-se 4 lotes de 9 placas de Petri.

O primeiro lote foi preparado e pesando-se 6 gramas de agar-agar e 6 gramas de bagaço de cana. Estes foram transferidos para um erlenmeyer de 500 mL, no qual adicionou-se 300 mL de água destilada. O erlenmeyer foi fechado, agitado e levado à autoclave por 20 minutos a uma temperatura de 120°C. Após a autoclavagem, o meio foi colocado em placas de Petri com capacidade de 25 mL, todo procedimento foi realizado próximo à chama dentro de um fluxo laminar. Ligou-se luz UV por 10 minutos nas placas.

Os demais lotes foram preparados de forma similar ao primeiro, porém além do aga-agar e bagaço de cana, também foi adicionado respectivamente aos lotes 3g de rejeito, 6g de rejeito, e 12g de rejeito.

Após a solidificação dos 4 lotes explantes de cada espécie fúngica, foram inoculadas em triplicata totalizando as 9 placas de cada lote. Todas as placas foram identificadas com data e código do fungo e mantidas em local com temperatura de 30°C protegidas da luz e os resultados foram avaliados no terceiro, quinto e sétimo dia.

4.4.1 Preparo do inóculo em grão de trigo

Para um crescimento apropriado dos fungos visando a posterior montagem do corpo de prova, foi realizada a inoculação em grãos de trigo seguindo os seguintes passos: os grãos de trigo lavados foram cozidos em água destilada fervente por aproximadamente 30 minutos na proporção 1:2 (g:ml), o excesso de água foi retirado e foi feita a adição de 2 % sulfato de cálcio ($CaSO_4$) em relação ao peso seco do grão (kg). A mescla foi acondicionada em sacos plásticos de polipropileno e autoclavados a 120 ºC por 20 minutos, a mistura permaneceu à temperatura ambiente. Foi realizada a inoculação pela transferência de 1 plugs de cultura (Ø

4-6 mm) da matriz primária (inóculo em BDA) para cada 4 gramas da mescla. A incubação foi feita em estufa tipo B.O.D. na ausência de luz à temperatura de 30 ± 1 ºC até a completa colonização dos grãos (MENEZES *et al*., 2016).

Para o presente trabalho foram preparados 102 inóculos visando à massa do substrato preparados na etapa posterior com as seguintes massas: 54 contendo 8g de grão de trigo e 48 contendo 12g de grão de trigo.

4.5 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

Inicialmente designou-se os lotes em: T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*), T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T3 561 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*) , T2 601 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) e T3 R601 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*). A tabela 1 apresenta o esquema de produção dos corpos de prova.

A primeira etapa para o preparo do material consiste em higienizar adequadamente os moldes. Nesse trabalho, foram utilizados dois tipos de moldes conforme apresentado na tabela 1: (i)Caixas de acetato (8cm x 8 cm x 3cm); e (ii) anéis de PVC com 7,5cm de diâmetro e 3cm de altura.

O processo de higienização adotado foi o mesmo para ambos os moldes. Assim, os moldes foram lavados com água, sabão e uma bucha nova, realizando uma etapa final de lavagem com bastante água. Posteriormente, os moldes foram colocados por 24h em solução de hipoclorito de sódio a 3%. Antes de iniciar a montagem foram feitas mais duas lavagens por submersão em água destilada, mexendo constantemente para retirada dos resíduos de hipoclorito de sódio. A finalização foi realizada distribuindo os moldes para secagem dentro do fluxo laminar com lâmpada UV ligada por 30 minutos. As tampas e bases foram fabricadas com papelão na medida dos moldes (7,5 cm de diâmetro e 8 cm x 8 cm) e cobertas por papel alumínio. Antes da utilização, foram empacotadas em sacos de papel Kraft e autoclavadas por 15 minutos.

Tabela 1- Esquema de produção dos corpos de prova**.**

Descrição	Quantidade de bagaço (g)	Quantidade de rejeito (g)	Quantidade produzida	Formato do molde
T1 - 561	10	-	9	cilíndrico (diâmetro de 7,5cm e altura 3cm)
T1 - 561	15	-	8	prismas de base quadrada (lado com 8cm e altura de 3cm)
T1 - 601	10	-	9	cilíndricas (diâmetro de 7,5cm e altura 3cm)
T1 - 601	15	-	8	prismas de base quadrada (lado com 8cm e altura de 3cm)
T2 - 561	10	5	9	cilíndricas (diâmetro de 7,5cm e altura 3cm)
T2 -561	15	7,5	8	prismas de base quadrada (lado com 8cm e altura de 3cm)
T2 - 601	10	5	9	cilíndricas (diâmetro de 7,5cm e altura 3cm)
T2 - 601	15	7,5	8	prismas de base quadrada (lado com 8cm e altura de 3cm)
T3 - 561	10	20	9	cilíndricas (diâmetro de 7,5cm e altura 3cm)
T3 – 561	15	30	8	prismas de base quadrada (lado com 8cm e altura de 3cm)
T3 – 601	10	20	9	cilíndricas (diâmetro de 7,5cm e altura 3cm)
T3 - 601	15	30	8	prismas de base quadrada (lado com 8cm e altura de 3cm)

Fonte: dados da pesquisa (2022).

A segunda etapa diz respeito à separação do material, hidratação e montagem. Isto foi executado seguindo os seguintes passos: inicialmente foi pesado em sacos plásticos os substratos e aditivo previsto para o teste. Aos sacos foi adicionado água destilada na mesma proporção da massa total. O conteúdo foi homogeneizado e deixado por 24 horas em repouso e os sacos plásticos, sem vedar completamente, foram autoclavados por 25 minutos. Assim

que retirados da autoclave, os sacos foram encaminhados rapidamente para o fluxo laminar a luz UV durante 20 minutos.

Dentro do fluxo, a mistura de cada saco foi colocada dentro do molde e, conjuntamente, foi adicionado o inóculo tanto na área inferior em contato com a base (metade do inóculo), quanto na área superior em contato com a tampa (outra metade do inóculo), sendo distribuídos homogeneamente. A tampa e a base foram colados nas laterais dos moldes com fita adesiva.

Ainda dentro do fluxo, as montagens fechadas com a base e tampa foram colocadas dentro de sacos plásticos novos com fechamento tipo *zip loc*, juntamente com algodão estéril e bem umedecido em água destilada autoclavada para manter a umidade. Os pacotes foram distribuídos nas prateleiras dentro da sala de cultivo, mantidos durante 21 dias à 30º C e na ausência de luz. A cada 7 dias, todas as amostras foram abertas dentro do fluxo laminar para avaliação visual do crescimento, fechadas novamente e colocadas na sala de cultivo.

Na terceira etapa, as amostras foram retiras dos moldes e secas em estufa de circulação à temperatura de 60°C durante 48h.

4.6 CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO DE MINERAÇÃO

4.6.1 DRX (Difratometria de raios X)

A análise por difração de raio X do rejeito de mineração de ferro foi realizada utilizando o equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD-7000. A análise foi conduzida utilizando anodo de cobre (radiação Cu $K\alpha_1$), monocromador de cristal de grafite, voltagem de 40kV, corrente de 30mA e a varredura foi realizada numa faixa de ângulo 2θ de 5º a 110º, tamanho do passo 0,02 2θ e tempo de exposição por passo de 3s. A identificação de fases no difratograma foi realizado utilizando a literatura científica em especial os artigos de AUGUSTO *et al*., 2018; FERREIRA *et al*., 2022; SILVA *et al*., 2020).

4.6.2 Granulometria a laser

A análise granulométrica foi realizada pela técnica de difração de laser, através do analisador de tamanho de partículas da marca CILAS, modelo 1090. Foi realizado em meio

aquoso, com tempo de dispersão por agitação mecânica e ultrassom de 60 segundos e obscuração de 12%. Foi inserido no equipamento aproximadamente 5,0 g de rejeito, realizando a leitura em uma faixa de 0,04 μm a 500 μm.

4.7 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.7.1 Caracterização da densidade

A densidade dos corpos de prova foi obtida a partir da relação entre massa e volume das amostras produzidas. A massa dos corpos de prova foi medida após a secagem realizada na etapa anterior em balança profissional digital mini do modelo TN – series 100gx0,001g, feito em seis réplicas. O volume de cada amostra foi obtido a partir das dimensões das amostras medidas usando paquímetro digital. O volume foi calculado usando a equação 1:

$$V = LXCXH \tag{1}$$

Onde L é a largura, C é o comprimento e H é a altura.

Os locais e número de medições foram selecionados com base na norma ASTM C303 – 21. A espessura foi medida ao longo das bordas em quatro locais diferentes, perto dos quatro vértices. O comprimento e a largura foram medidos em três locais, sendo duas medidas realizadas próximas às extremidades e a terceira no centro.

4.7.2 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado em triplicada para cada grupo. As amostras com medidas de 8cm x 8cm e altura de 3cm, foram testadas para determinar a taxa de absorção de água quando colocadas sobre a água. As amostras foram colocadas sobre uma camada de água de 3mm mantida a 23 ± 1 °C em uma bandeja. O peso foi aferido em diferentes períodos de tempo em 1, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 96 e 192h, utilizando uma balança profissional digital mini do modelo TN – series 100g x 0,001g.

Para cada medição, as amostras foram retiradas do recipiente, a água da superfície foi removida das amostras manualmente com papel de filtro e pesado dentro de 1 minuto após a

remoção da água. Essa metodologia foi descrita por Appels *et al.* (2019).

4.7.3 Análise térmica por Termogravimetria (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) foi realizada para estudar o comportamento de decomposição térmica das amostras. Para realização do ensaio, amostras de aproximadamente 10mg foram cortadas dos corpos de prova com auxílio de um bisturi. O ensaio utilizou o equipamento STA7200RV da HITACHI, em uma faixa de temperatura compreendida entre a 25°C até 600°C, com taxa de aquecimento mantida em $10°C.min^{-1}$ e fluxo de nitrogênio de $60ml.min^{-1}$.

4.7.4 Análise por Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em microscópio JSM-IT300 da JEOL, aplicada a 12 amostras sendo 6 próxima da borda do material e 6 da parte central anteriormente metalizadas com fina camada de ouro. As amostras correspondem à área interna e externa do biocompósito, a voltagem de aceleração dos elétrons de 20 kV e magnificação das imagens de 50, 200 e 2000 vezes. As imagens foram analisadas utilizando o software ImageJ para realizar a medição dos diâmetros das hifas, foram realizadas 100 medidas de cada imagem.

4.7.5 Análise por Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O estudo da espectroscopia vibracional na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi realizado em espectrômetro Shimadzu Prestige 21. A análise foi realizada em 8 amostras, seis dos corpos de prova produzidos, uma do substrato isolado e uma do rejeito de mineração. Os espectros foram analisados na faixa de varredura de 4000 a 400 cm^{-1}.

4.7.6 Ensaio de compressão

A resistência à compressão dos corpos de prova foi analisada em uma máquina universal Shimadzu modelo AG – X 10kN, de acordo com a norma ASTM C165 − 07/2017

com adaptações, fixando o deslocamento em 3 $mm.min^{-1}$. As amostras foram cilíndricas, conforme molde (Ø: 7,5cm, h: 3 cm), foram realizadas 6 réplicas para cada teste realizado. A resistência a compressão foi obtida pela equação 2.

$$S = W/A \tag{2}$$

onde:

S = resistência à compressão, psi (ou Pa),

W = carga em qualquer deformação, lbf (ou N), e

A = área original média calculada a partir de medições, in^2 (ou m^2).

O módulo de elasticidade foi calculado utilizando a equação 3.

$$E = \frac{W/A}{e/d} \tag{3}$$

onde:

E = módulo de compressão, psi (ou Pa),

e = deformação compressiva, pol. (ou mm), e

d = espessura da amostra, pol. (ou mm).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PREPARO DO RESÍDUO AGROINDUSTRIAL (BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR)

Na produção de materiais micocompósitos, o substrato serve como fonte de nutrientes para o crescimento do fungo e como uma estrutura de base para o material, sendo que o tamanho e a estrutura do substrato interferem nas propriedades do material resultante (SANTOS, 2020). Com relação ao tamanho, têm-se observado que partículas >2 mm atuam de modo a reduzir a densidade do material final, enquanto tamanhos muito finos diminuem a aeração dentro do material, e assim, influenciam negativamente no crescimento do fungo (GIROMETTA *et al.*, 2019; LELIVELT *et al.*, 2015; PELLETIER, *et al.*, 2013). Desta forma, a granulometria do bagaço de cana de açúcar utilizado para a produção dos corpos de prova foi padronizada, com o intuito de avaliar a influência de outras variáveis, tais como a espécies de fungo, nas propriedades do material. A figura 6 ilustra os fragmentos de bagaço resultantes após a seleção feita nas peneiras.

Figura 6 – Frações de bagaço selecionados após peneiramento (1) fragmentos menores que 12,5mm e maiores que 9,5mm; (2) fragmentos menores que 9,5mm e maiores que 4,75mm e (3) fragmentos de bagaço retidos no fundo da peneira (menores que 4,75mm). Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Durante este estudo, os fragmentos da amostra do bagaço de cana que ficaram retidos na peneira 1 (abertura de 12,5mm) representam 16%, os que ficaram retidos na peneira 2 (abertura de 9,5mm) representam 13% e os fragmentos retidos na peneira 3 (abertura de 4,75mm) representam 19% do bagaço de cana. Foi observado que a maior parte, em torno de 52%, dos fragmentos teve tamanho superior a 12,5mm. Esse resultado indica que o processo de moagem gerou grande perda de material uma vez que grande parte dos fragmentos ficaram com o tamanho superior a 12,5mm e foram descartados. Os fragmentos que passaram na peneira 2 foram usados na obtenção de corpos de prova. E o restante dos fragmentos do

bagaço de cana que passaram pelo conjunto de peneiras constituem-se como partículas finas e foram usadas para a obtenção dos materiais submetidos nos testes de placas. É importante destacar que quanto maior for a porção do substrato fino na obtenção de compósitos baseados em micélio fúngico maior será a densidade final do compósito delimitando a sua aplicação como material com potencial tecnológico (GIROMETTA *et al.*, 2019).

5.2 TESTE QUALITATIVO PARA AVALIAR OS FUNGOS COM MAIOR CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE ENZIMAS PEROXIDASES

O sistema enzimático ligninolítico produzido por fungos basidiomicetos se caracteriza por sua inespecificidade e é produzido em resposta às condições de cultivo. É cada vez mais evidente o fato de basidiomicetos serem de alta eficácia na degradação de compostos recalcitrantes devido ao sistema enzimático ligninolítico produzido (YAMANAK; MACHADO, 2007). A utilização de corantes como substratos para a determinação da atividade ligninolítica foi sugerida, inicialmente, por Glenn e Gold (1983) e se estabeleceu como método para a identificação de microrganismos capazes de degradar compostos xenobióticos. Com esta análise objetivou avaliar indiretamente a influência do corante Azul Brilhante de Remazol R (RBBR) sobre a produção do sistema enzimático ligninolítico dos fungos *Trametes villosa* e *Ganoderma lucidum* envolvidos na descoloração do próprio corante.

Na tabela 2 é mostrada a evolução da descoloração durante a realização do teste. A descoloração do RBBR resultou, provavelmente, da produção de biomassa micelial e na síntese de ligninases como foi descrito por Carneiro *et al.* (2021).

Tabela 2- A evolução do raio de descoloramento durante a realização do teste.

Isolado	Dia 3 (cm)	Dia 5 (cm)	Dia 7 (cm)
CCMB 561	1,4	7,1	8,2
CCMB 379	2,6	5,5	7,3
CCMB 601	3,0	6,9	8,5
CONTROLE	0	0	0

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022.

O resultado apresentado na Tabela 2 mostra que os fungos *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (CCMB 601) e *Ganoderma sp. 1* - DHCR (CCMB 379) apresentam maiores

halos de degradação no período de três dias, 3 e 2,6 cm respectivamente. Em cinco dias, o fungo *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (CCMB 601) manteve o crescimento do halo de degradação apresentando 6,9 cm e o *Trametes villosa* (CCMB 561) passou a apresentar a medida de 7,1 cm de halo de degradação, um resultado superior ao fungo *Ganoderma sp. 1* - DHCR (CCMB 379) que apresentou um pequeno aumento para 5,5 cm. Já no final dos sete dias, foi possível observar que os fungos *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (CCMB 601) e *Trametes villosa* (CCMB 561) apresentaram um tamanho superior de 8,5 e 8,2 cm, respectivamente, do halo de degradação. Ao final dos sete dias o fungo *Ganoderma sp. 1* - DHCR (CCMB 379) apresentou o menor tamanho do halo de degradação (7,3 cm). Em relação ao controle, não foi observado descoloração do corante RBBR durante o período estudado e consequentemente não se observou a formação de halo de degradação. Esse comportamento do controle é esperado uma vez que é uma amostra composta apenas por bagaço de cana e corante RBBR.

A Figura 7 mostra as imagens que representam o crescimento dos halos de degradação do corante RBBR pelos os fungos *Trametes villosa* CCMB 561, *Ganoderma lucidum* CCMB601, Ganoderma sp. DHCR 379 no intervalo de tempo estudado.

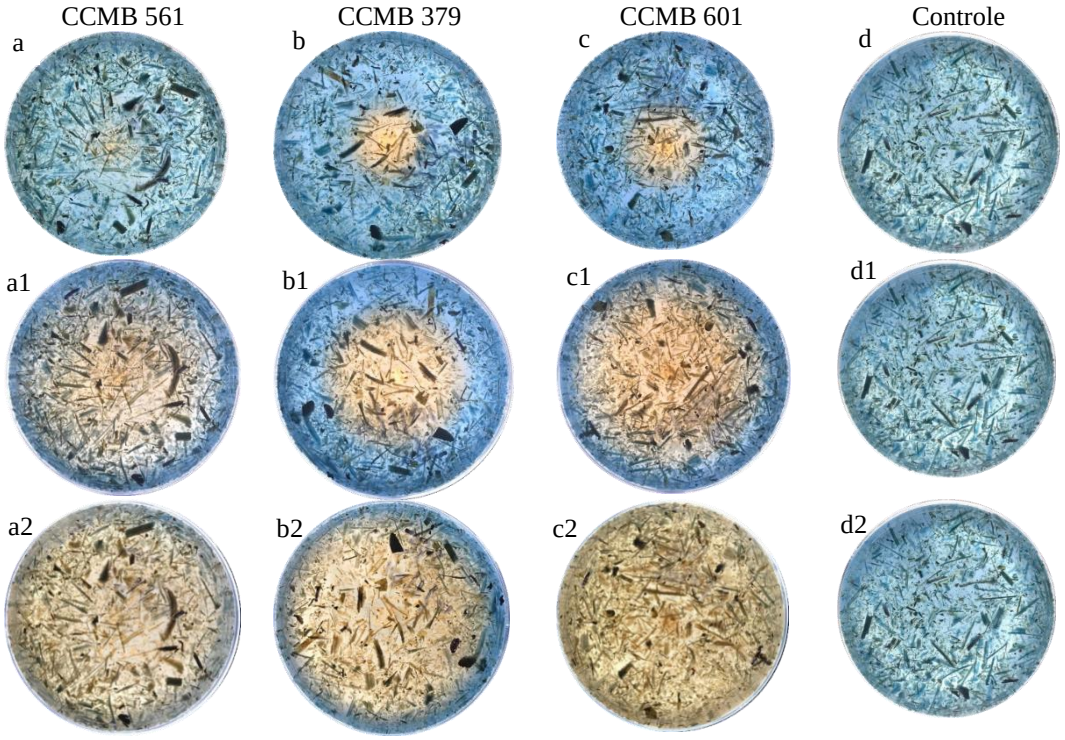


Figura 7- Avaliação da medida indireta da produção de enzimas ligninolíticas pelos fungos *Trametes villosa* CCMB 561, Ganoderma sp. DHCR 379, *Ganoderma lucidum* CCMB601. O (a) representa o fungo *Trametes*

villosa CCMB 561, o (b) representa o fungo Ganoderma sp. DHCR 379, o (c) representa o fungo *Ganoderma lucidum* CCMB601 e o (d) representa o controle no dia 3 do experimento. O (a1), (b1), (c1), (d1) representa os respectivos fungos no dia 5 do experimento. O (a2), (b2), (c2), (d2) os respectivos fungos no dia 7 do experimento. Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Com base neste teste, observou-se que os fungos que apresentam maiores valores nos halos de degradação do corante RBBR foram o *Ganoderma lucidum* (601) e o *Trametes villosa* (561). Esses fungos basidiomicetos, atuam de maneira a degradar diferentes tipos de estruturas químicas que compõem o corante por meio da produção de enzimas extracelulares como a manganês peroxidase, a lignina peroxidase e a lacase que degradam as diferentes estruturas da lignina (WESENBERG et al., 2003). É importante destacar que a atividade descolorante de RBBR é um método indicativo simples para um sistema multienzimático e, sendo assim, a taxa de descoloração pode não estar relacionada a uma enzima em particular, mas ao resultado da ação do mecanismo ligninolítico ao degradar o bagaço da cana de açúcar.

5.3 TESTE PARA DETERMINAÇÃO DA MELHOR QUANTIDADE DE REJEITO PARA O CRESCIMENTO DOS FUNGOS

Com objetivo de verificar o crescimento do fungo na presença do rejeito de mineração no compósito baseado em micélio fúngico realizou-se o seguinte teste e a melhor quantidade de rejeito para o crescimento dos fungos foi determinada. O resultado do teste foi apresentado com 3 dias, 5 dias e 7 dias de incubação. O lote 1 representa o controle e foi realizado na ausência do rejeito de mineração. O lote 2 continha 3g de rejeito estabelecendo uma relação de rejeito-substrato de 0,5:1, o lote 3 tinha 6g de rejeito estabelecendo uma relação de rejeito-substrato de 1:1, e o lote 4 tinha 12g de rejeito com relação de rejeito-substrato de 2:1. O crescimento dos fungos *Trametes villosa* CCMB 561, Ganoderma sp. DHCR 379 e *Ganoderma lucidum* CCMB601 no rejeito de mineração foi registrado após o terceiro dia. Os resultados estão apresentados na Figura 8.

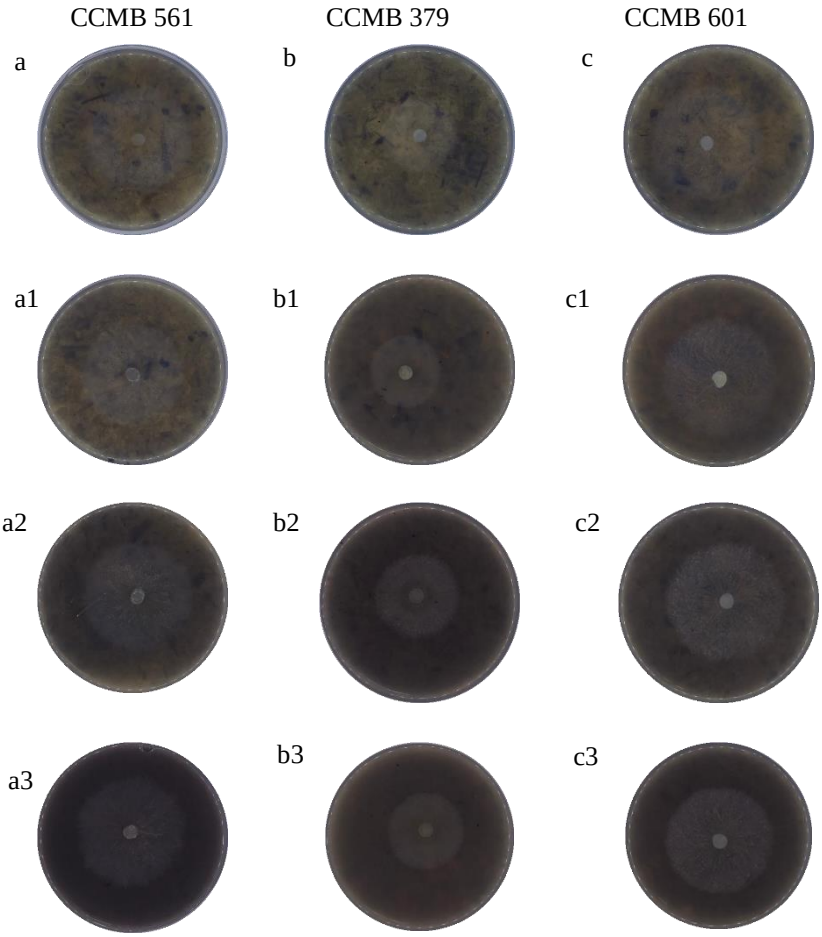


Figura 8- Crescimento dos fungos em rejeito no terceiro dia de incubação. O (a) representa o lote 1 (controle) do fungo *Trametes villosa* CCMB 561, o (b) representa o lote 1 (controle) do fungo Ganoderma sp. DHCR 379, o (c) representa o lote 1 (controle) do fungo *Ganoderma lucidum* CCMB601. O (a1), (b1) e (c1) representa o lote 2 (0,5:1) dos respectivos fungos. O (a2), (b2) e (c2) representa o lote 3 (1:1) dos respectivos fungos. O (a3), (b3) e (c3) representa o lote 4 (2:1) dos respectivos fungos. Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Como mostrado na Figura 8 é possível observar, no terceiro dia, um discreto crescimento dos fungos *Trametes villosa* CCMB 561, Ganoderma sp. DHCR 379 e *Ganoderma lucidum* CCMB601, ainda pouco visível apresentando a coloração escura no meio dos discos devido à presença do rejeito de mineração. Destaca-se que o crescimento dos fungos nos materiais estudados é semelhante independente da proporção rejeito/substrato. Isso pode ser verificado pela similaridade do crescimento dos fungos tanto nas placas contendo rejeito quanto no controle. Foi observado que o crescimento do fungo *Ganoderma sp*. DHCR 379 foi inferior aos outros fungos estudados no período de três dias.

A Figura 9 apresenta o crescimento dos fungos *Trametes villosa* CCMB 561,

Ganoderma sp. DHCR 379, *Ganoderma lucidum* CCMB601 e no rejeito de mineração após cinco dias de incubação.

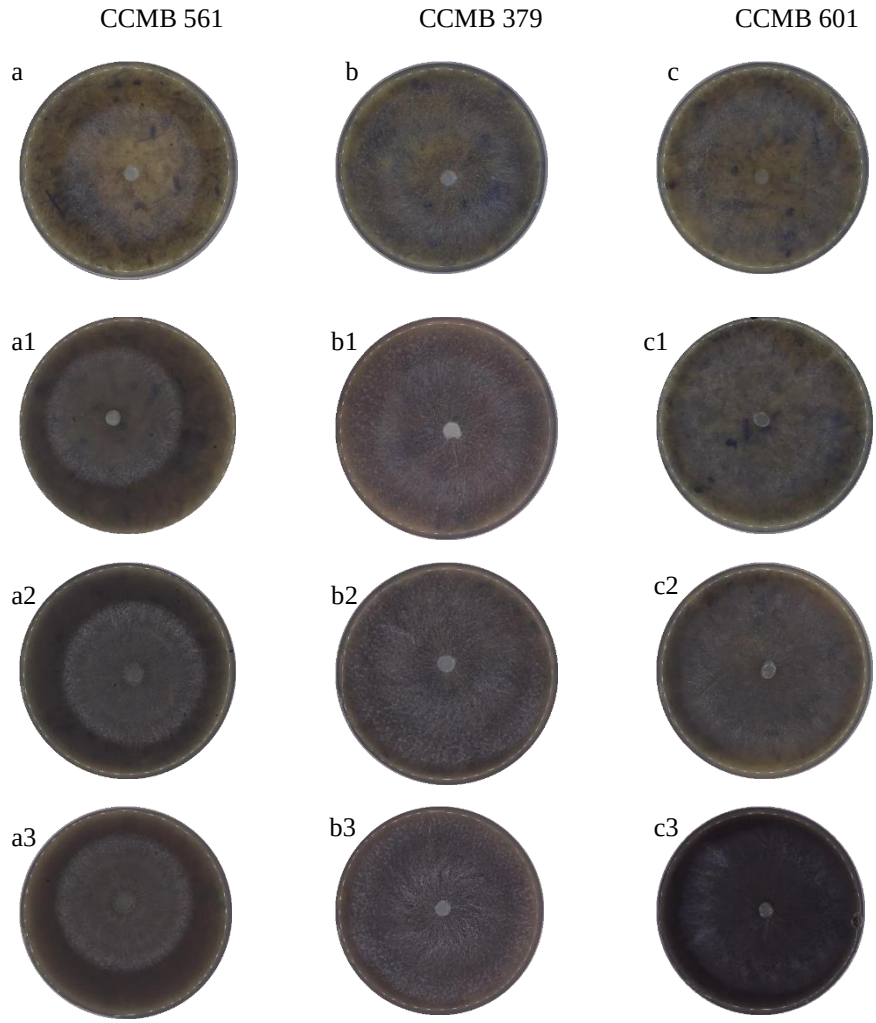


Figura 9- Crescimento dos fungos em rejeito no quinto dia de incubação. O (a) representa o lote 1 (controle) do fungo *Trametes villosa* CCMB 561, o (b) representa o lote 1 (controle) do fungo Ganoderma sp. DHCR 379, o (c) representa o lote 1 (controle) do fungo *Ganoderma lucidum* CCMB601. O (a1), (b1) e (c1) representa o lote 2 (0,5:1) dos respectivos fungos. O (a2), (b2) e (c2) representa o lote 3 (1:1) dos respectivos fungos. O (a3), (b3) e (c3) representa o lote 4 (2:1) dos respectivos fungos. Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

No quinto dia, como mostrado na Figura 9, observa-se que a região clara está mais evidente nas amostras e consequentemente, a região escura está menor. Este resultado mostra que os fungos *Trametes villosa* CCMB 561, *Ganoderma lucidum* CCMB601e Ganoderma sp. DHCR 379 estão crescendo e produzindo maior quantidade de biomassa micelial. Além disso, observa-se que o aumento da quantidade do rejeito de mineração em relação ao substrato nas

placas do lote 4 com relação rejeito:substrato de 2:1 levou a um maior crescimento de todos os fungos.

Após sete dias, o crescimento dos fungos *Trametes villosa* CCMB 561, *Ganoderma lucidum* CCMB601 e Ganoderma sp. DHCR 379 na presença do rejeito de mineração está mostrado na Figura 10.

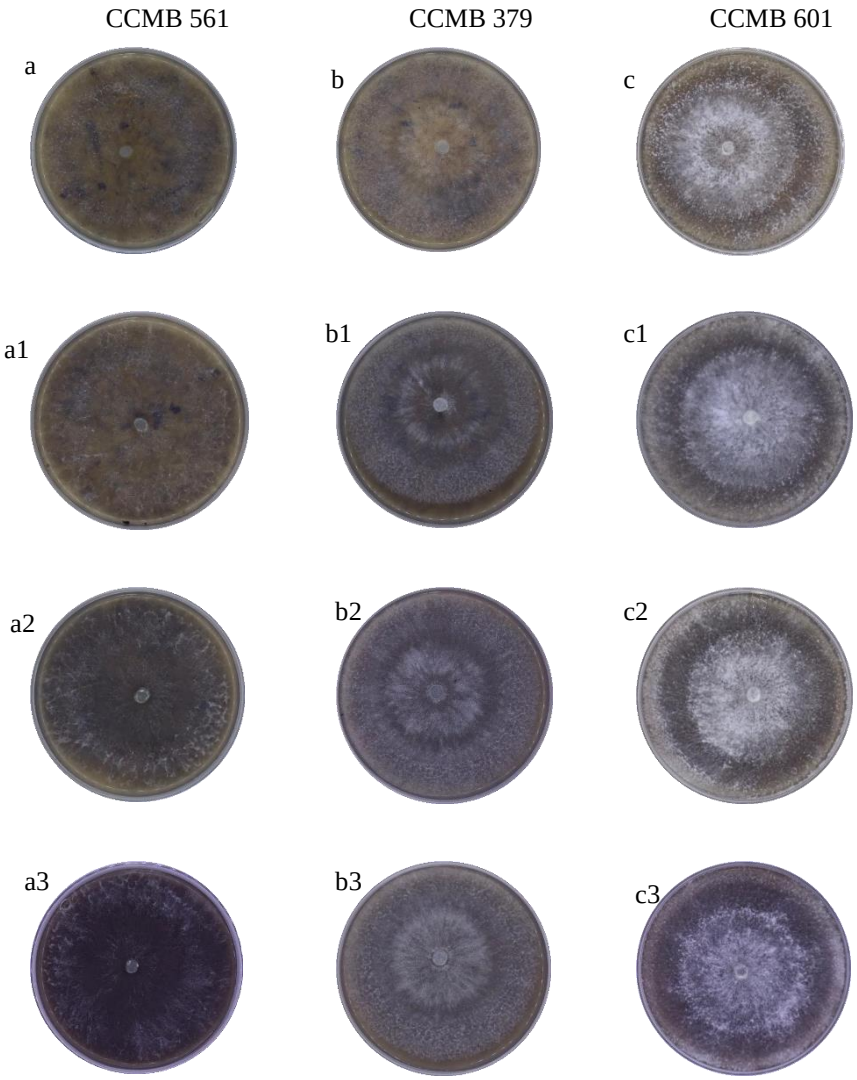


Figura 10- Crescimento dos fungos em rejeito no sétimo dia de incubação. O (a) representa o lote 1 (controle) do fungo *Trametes villosa* CCMB 561, o (b) representa o lote 1 (controle) do fungo Ganoderma sp. DHCR 379, o (c) representa o lote 1 (controle) do fungo *Ganoderma lucidum* CCMB601. O (a1), (b1) e (c1) representa o lote 2 (0,5:1) dos respectivos fungos. O (a2), (b2) e (c2) representa o lote 3 (1:1) dos respectivos fungos. O (a3), (b3) e (c3) representa o lote 4 (2:1) dos respectivos fungos. Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

No sétimo dia, destaca-se o crescimento do fungo *Ganoderma lucidum* (601). Este

fungo foi o que melhor se adaptou as condições do meio apresentando-se mais favoráveis para crescer na presença do rejeito de mineração, quando comparado aos outros fungos. À medida que aumentou a quantidade de rejeito de mineração na placa, os fungos *Ganoderma lucidum* CCMB601, Ganoderma sp. DHCR 379 e *Trametes villosa* CCMB 561, apresentaram um crescimento mais acentuado principalmente o *Ganoderma lucidum* CCMB601 e *Trametes villosa* CCMB 561.

De maneira geral, foi possível observar nas Figuras 8, 9 e 10 que em todas as condições de cultivo houve formação de micélios fúngicos (região esbranquiçada) para todas as situações testadas. Com o presente teste foi possível constatar que o rejeito não provocou inibição no crescimento dos fungos, pois para todas as concentrações utilizadas houve crescimento mais acentuado dos fungos *Ganoderma lucidum* CCMB601, Ganoderma sp. DHCR 379 e *Trametes villosa* CCMB 561 quando comparado ao controle. A presença do rejeito de mineração na proporção 2:1 de rejeito/substrato no período de sete dias foi a que mais favoreceu o crescimento dos fungos *Ganoderma lucidum* CCMB601 e *Trametes villosa* CCMB 561 e, isso demonstra a importância do rejeito na condição de cultivo dos fungos.

De acordo com Valginhak e Dalla Santa (2018) no crescimento de linhagens de *Ganoderma*, quando se utiliza sais minerais como fosfato de potássio, cloreto de cálcio, e sulfato de magnésio, observa-se um crescimento micelial mais significativo, evidenciando o importante papel da suplementação mineral no crescimento de fungos basidiomicetos. Além disso, o comportamento observado nos resultados mostrados na Figuras 8, 9 e 10 pode estar associado a composição química do rejeito de mineração no qual a presença de alguns metais, como o ferro, favorece o crescimento desses fungos. A presença de alguns metais no desenvolvimento dos fungos basidiomicetos já foi relatado na literatura por Almeida *et al*., 2015; Meniqueti *et al*., 2020 e Umeo *et al*., 2020.

5.4 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

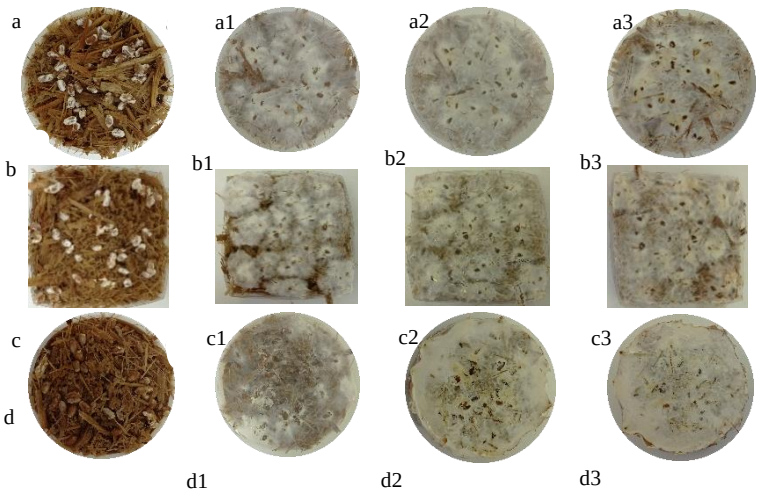
Os corpos de prova foram preparados utilizando o bagaço da cana de açúcar como substrato, o rejeito de mineração como aditivo e os fungos *Trametes villosa e Ganoderma lucidum.* A identificação dos corpos de prova preparados assim como a suas composições são as seguintes: T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*), T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T3 561 (rejeito de mineração na

proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*) , T2 601 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*) e T3 R601 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*).

Na Figura 11 é apresentado o acompanhamento do processo de desenvolvimento do corpo de prova a partir da evolução de crescimento dos micélios em 7, 14 e 21 dias para os dois formatos de corpo de prova.

A análise visual dos materiais nos permitiu observar que a completa colonização do substrato pelos micélios ocorreu a partir do dia 14. Este comportamento é diferenciado para a amostra T3-601 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*), no qual mostra que a partir do sétimo dia já é possível observar a completa formação do micocompósito. A presença do rejeito de mineração também teve influência nos resultados, visto que as amostras que não contém rejeito de mineração em sua composição ou contém baixas concentrações demoraram mais tempo para desenvolverem os micélios fúngicos de modo a formarem os micocompósitos. A partir do 21º dia, para todos os corpos de prova, o resíduo já foi tomado pelo completo crescimento dos fungos, indicando que o micocompósito estava completamente formado.

Nos corpos de prova produzidos foi observado, em uma análise visual, que o crescimento dos micélios e a aparência dos corpos de prova produzidos com o *Ganoderma lucidum* estava mais uniforme com a camada de fungo mais espessa que os corpos de prova produzidos com o *Trametes villosa.*



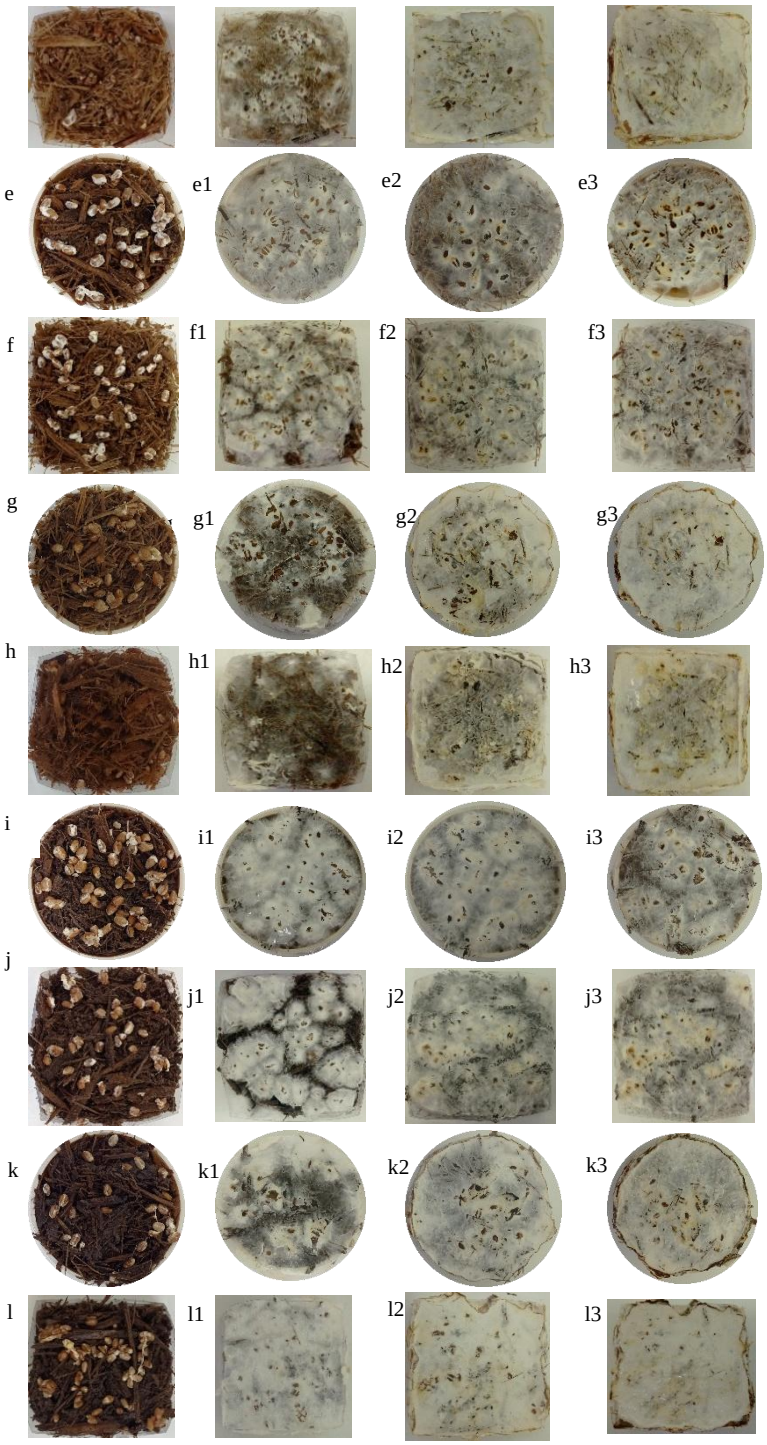


Figura 11 - Representação das etapas de crescimento do micélio dos fungos na presença do bagaço de cana de açúcar e rejeito de mineração. O (a), (a1), (a2), (a3), (b), (b1), (b2) e (b3) representa o T1-561com 10g e 15g de bagaço de cana de açúcar no dia 0, 7, 14 e 21 respectivamente. O (c), (c1), (c2), (c3), (d), (d1) (d2), (d3) o T1 601 com 10g e com 15g de bagaço de cana de açúcar no dia 0, 7, 14 e 21 respectivamente. O (e), (e1), (e2), (e3), (f), (f1) (f2), (f3) o T2 561 com 10g e com 15g de bagaço de cana de açúcar no dia 0, 7, 14 e 21 respectivamente. O (g), (g1), (g2), (g3), (h), (h1) (h2), (h3) o T2 601 com 10g e com 15g de bagaço de cana de açúcar no dia 0, 7, 14 e 21 respectivamente. O (i), (i1), (i2), (i3), (j), (j1) (j2), (j3) o T3 561 com 10g e com 15g de bagaço de cana

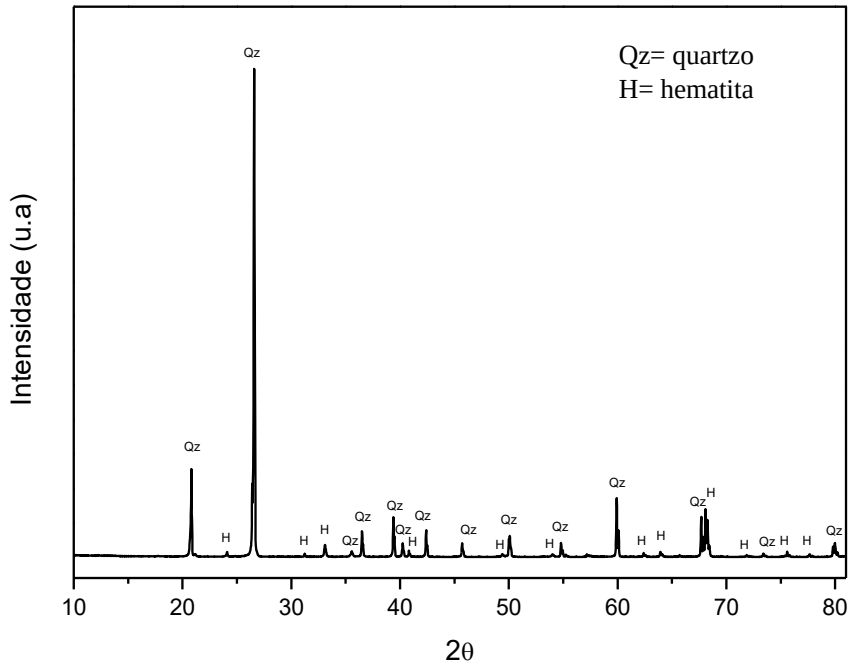
de açúcar no dia 0, 7, 14 e 21 respectivamente. O (k), (k1), (k2), (k3), (l), (l1) (l2), (l3) o T3 601 com 10g e com 15g de bagaço de cana de açúcar no dia 0, 7, 14 e 21 respectivamente. Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

5.5 CARACTERIZAÇÃO DO REIJEITO DE MINERAÇÃO

5.5.1 Difração de raios X (DRX)

O difratograma obtido para o rejeito de mineração utilizado na preparação dos micocompósitos está representado no Gráfico 1.

Gráfico 1- Difratograma de raios X do rejeito de mineração utilizado nos compósitos.



Fonte: Dados do autor, 2022.

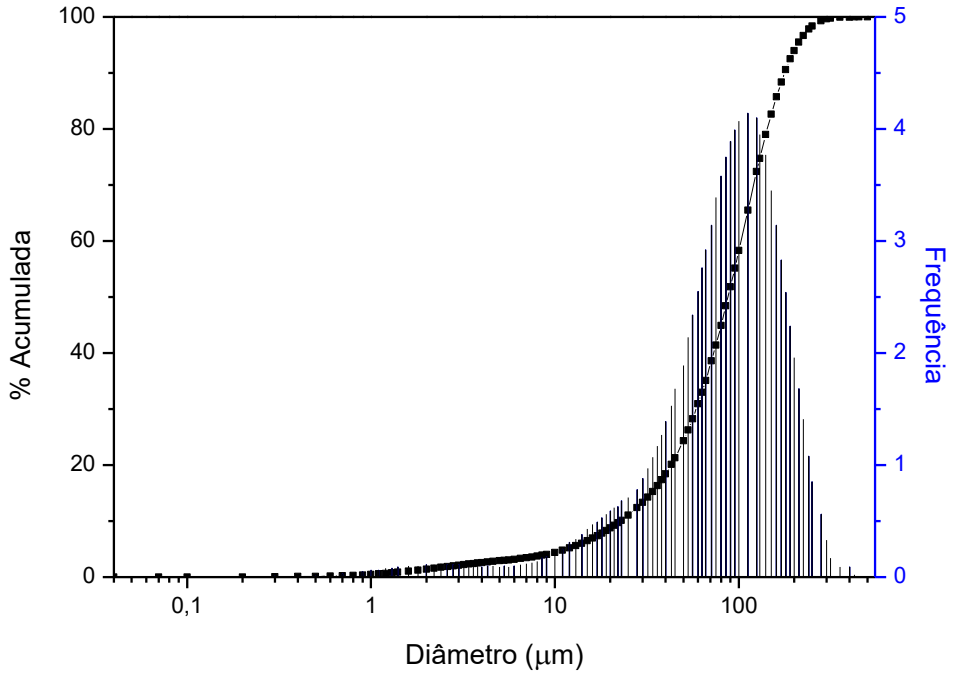
De acordo com o gráfico 1 representado acima, as principais fases minerais identificadas no rejeito de mineração foi a hematita (Fe_2O_3) e o quartzo (SiO_2) podendo ser confirmada pela presença em maior quantidade dos picos de difração. Além disso, observa-se que o rejeito de mineração de ferro é cristalino e composto por fases minerais estáveis. É conhecido que a maioria dos rejeitos de mineração são compostos de fases finas de óxido de ferro (Fe_xO_y) e quartzo (SiO_2), outros minerais como alumina podem ser encontrados em menor quantidade (FERREIRA et al., 2022; SILVA et al., 2020). Sendo assim, devido a sua

composição, o rejeito de mineração de ferro pode ser incorporado como aditivos em diferentes compósitos dando origem a novos materiais com potencial para ser utilizado principalmente em construção civil, como madeira plástica, quando utilizados em compósitos poliméricos e no desenvolvimento de micocompósitos, quando utilizados como aditivo (ALMADA *et al*., 2022; CECHIN *et al*., 2022; ZHANG; TANG; LIU, 2021; COURA, 2018; SIERRA, 2022).

5.5.2 Granulometria a laser

Foi realizada a análise granulométrica por difração a laser da amostra de rejeito de mineração utilizada na obtenção dos micocompósitos. A técnica de análise de tamanho de partículas por difração de laser é um método pelo qual as partículas são dispersas num fluído em movimento causando descontinuidades no fluxo do fluído, que são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho de partícula. A maioria dos equipamentos utilizam modelos ópticos em seus softwares de análise baseados em duas teorias: espalhamento de Mie ou na difração de Fraunhofer. A curva granulométrica obtida é mostrada no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Curva granulométrica obtida pelo método de granulometria a laser para o rejeito de mineração.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

Os tamanhos médios das partículas a 10% (D10), 50% (D50) e 90% (D90) foram 22,69 μm, 87,19 μm, 177,29 μm, respectivamente, e seu tamanho média igual a 95,49 μm.

HUANG *et al*. (2013) ressaltam que o tamanho médio das partículas é cerca de 5μm e que 90% das partículas são menores que 40μm. YANG et al., (2014) caracterizaram o rejeito de minério de ferro proveniente da cidade de Jiangsu, na China, e mostraram que 96% das partículas tinham diâmetro menor que 50μm, diferente do resultado obtido na presente pesquisa. Entretanto, GUIMARÃES (2011) observou que nas lamas de rejeito de minério de ferro, um grande percentual da amostra (40-60%), tem granulometria acima de 10 μm corroborando com os dados apresentados neste estudo.

Uma possível explicação para a variação na distribuição de tamanho das partículas encontrada em diversas pesquisas seria uma indicação de geologia inerente às diferentes regiões e das propriedades das jazidas e do material, além do processo de redução de tamanho (britagem e moagem) e compactação que os resíduos sofrem enquanto são quebrados (YELLISHETTY *et al*., 2008).

5.6 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

5.6.1 Caracterização da densidade

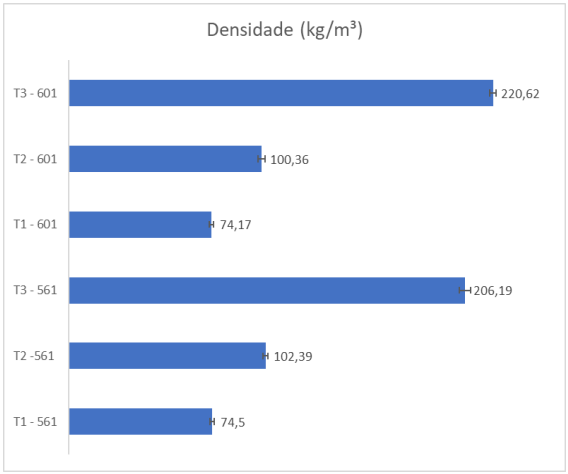
A densidade é uma variável importante na caracterização do corpo de prova dos compósitos baseados em micélio fúngico. A densidade desses materiais é controlada pelas condições ambientais e nutricionais (SANTOS *et al*., 2020). Os valores obtidos de densidade para as amostras T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*), T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T3 561 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*) , T2 601 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) e T3 R601 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) estão apresentados na Tabela 3 e no Gráfico 3.

Tabela 3- Valores de densidade para os corpos de prova T1, T2, T3 para os dois fungos estudados, *Trametes villosa CCMB 561 e Ganoderma lucidum 601*.

Amostra	Densidade média (kg/m³)	Aumento em relação à amostra sem rejeito (%)	Desvio padrão	Erro padrão
T1 – 561	74,50	-	3,26	1,15
T2 -561	102,39	137,44	3,75	1,32
T3 - 561	206,19	201,38	8,39	2,97
T1 - 601	74,17	-	3,21	1,13
T2 - 601	100,36	135,62	5,29	1,87
T3 - 601	220,62	216,29	4,43	1,57

Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Gráfico 3- Comparação entre os valores obtidos de densidade para os corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.



Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

A densidade está sendo diretamente influenciada pela presença do rejeito de mineração como pode ser visto na Tabela 3 e no Gráfico 3. Os corpos de prova T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), e T3 561

(rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*) apresentam maiores valores de densidade, 102, 39 e 206, 19 kg/m^3 respectivamente, quando comparada ao T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*) que apresentou valor de 74,5 kg/m^3. O mesmo comportamento foi observado quando foi utilizado o fungo *Ganoderma lucidum*. A adição do rejeito de mineração nos corpos de prova T2 601 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) e T3 601 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) aumentou a densidade para 135,62 e 212, 29 kg/m^3, respectivamente, quando comparada ao T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*) que apresentou o valor de 74,17 kg/m^3.

A variação do fungo não alterou o valor da densidade, pois ambas as amostras T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*) e T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*) apresentaram valores de densidade próximos, 74,50 e 74,17 kg/m^3, respectivamente. O espaço entre as fibras (porosidade do material) é diretamente relacionado com os valores de densidade. Como visto na granulometria a laser, o rejeito apresenta-se como partículas finas com o tamanho médio de 95,49 μm e, portanto, o rejeito ocupa facilmente os espaços entre as fibras. Além disso, acredita-se que a densidade do rejeito puro é superior à densidade do bagaço de cana de açúcar justificando a elevação nos valores de densidade.

Segundo Tacer-Caba *et al.* (2020) a condição de crescimento afeta a densidade mais do que a espécie de fungo, assim como também foi visto no presente trabalho. Outro fator relevante relacionado à densidade é a porosidade dos corpos de prova, considerada um fator significativo dos compósitos baseados em micélio de fungos, esse fator está relacionado com as dimensões do substrato e a presença de aditivos (rejeito de mineração) que ocupam os espaços vazios entre as fibras.

Os resultados encontrados (menor densidade 74,17 kg/m^3 e maior 220,62 kg/m^3) estão dentro da faixa de valores descritos na literatura para substratos semelhantes. Segundo Appels *et al.* (2019) a densidade dos materiais compostos de micélio variou de 100 a 390 kg/m3, seus materiais foram fabricados utilizando como substrato serragem de faia, Palha de colza e Mogu em algodão não tecido de baixa qualidade Já para Elsacker *et al.* (2019) a densidade, para as amostras estudadas por ele variou de 59,77 kg/m^3 até 186,45 kg/m^3, os substratos utilizados foram fibras resíduos de linho solto, cânhamo solto, estopa de linho não tratada, madeira solta e palha solta. Muitos estudos caracterizam os materiais de micélio como materiais de grau de espuma de polímero com densidades de até 318 kg/m^3 (JONES *et al.*, 2021, TACER-CABA

et al., 2020).

A densidade é geralmente aceita como um bom indicador das propriedades mecânicas de materiais de base biológica. Os compósitos baseados em micélio fúngico são frequentemente considerados semelhantes as espumas sólidas por sua baixa densidade, alta porosidade e leve rigidez. As densidades de materiais semelhantes à espuma à base de micélio fúngico podem variar de 59 a 318 kg/m^3. As espumas de poliestireno estendido foram consideradas como seu principal concorrente, com densidades em torno de 50 kg/m^3. Por outro lado, densidades mais altas de compósitos de micélio têm sido destacadas como um contribuinte significativo para o comportamento elástico dos materiais, devido ao preenchimento dos microporos dos materiais compósitos (TACER-CABA *et al.*, 2020).

5.6.2 Ensaio de absorção de água

Com o intuito de verificar a absorção de água nos compósitos baseados em micélio fúngico, dos corpos de prova T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*), T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T3 561 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*) , T2 601 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) e T3 R601 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) foi realizado o ensaio de absorção de água e os resultados estão representados na Tabela 4 e no Gráfico 4 a e b.

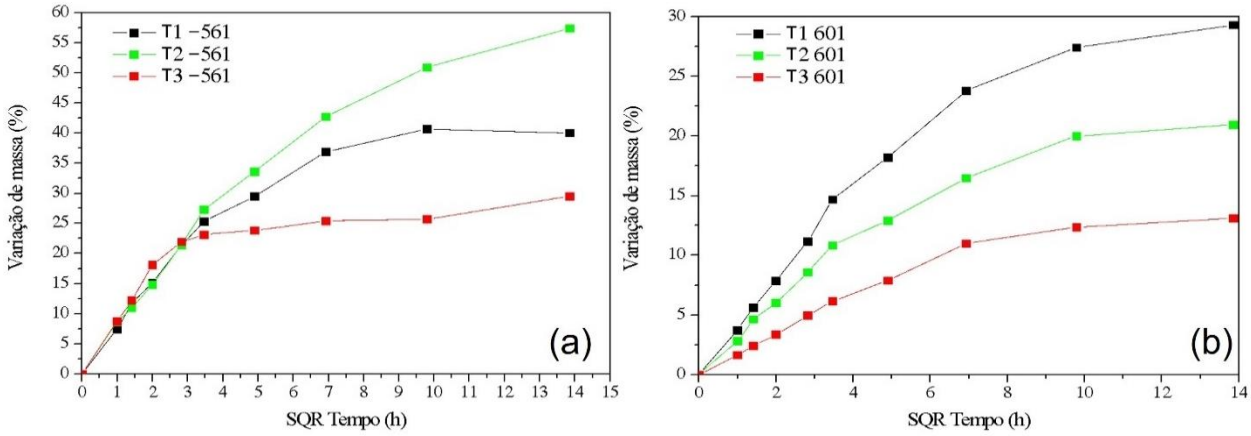
Tabela 4- Ensaio de absorção de água realizado para os corpos de prova T1, T2, T3 produzidos com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.

Amostras	Massa média final (g)	Massa média inicial (g)	Água absorvida (g)	% de aumento de massa	Desvio padrão	Erro padrão
T1 – 561	18,8	12,5	6,2	49,6	2,4	1,4
T2 -561	29,2	18,9	10,6	55,9	1,5	0,9
T3 - 561	48,0	37,7	10,2	27,2	7,5	4,3
T1 - 601	20,0	15,7	4,2	27,2	0,6	0,4
T2 - 601	23,9	20,0	3,9	19,7	3,0	1,8

T3 - 601	46,4	41,0	5,4	13,1	2,1	1,2

Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Gráfico 4 - Curvas de absorção de água para os corpos de prova contendo (a) o fungo 561 (*Trametes villosa*) e (b) fungo 601 (*Ganoderma lucidum*)



Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

No teste para avaliar a absorção de água nos corpos de prova foi possível verificar que os corpos de prova com maior proporção de rejeito T3 561 e T3 601 absorveram menor quantidade de água (27,2 % para T3 561 e 13,1 % para o T3 601) quando comparadas aos corpos de prova sem rejeito em sua composição T1 561 e T1 601 (49,6% para T1 561 e 27,2% para o T1 601) como pode ser visto na Tabela 4 e no Gráfico 4. A presença do rejeito de mineração em ambas as proporções 0,5:1 e 2:1 de rejeito/substrato proporciona condições de cultivo favoráveis para o crescimento do fungos *Trametes villosa* e *Ganoderma lucidum* como já foi visto nas Figuras 8-11. Portanto, nessa condição há formação de compósitos baseados em micélio fúngico mais densos, como foi visto na Tabela 3 e Gráfico 4 e consequentemente, nesses corpos de prova a absorção de água é inferior em comparação aos corpos de prova compostos apenas pelo substrato como no caso de T1 561 e T1 601. A menor absorção de água pode ocorrer devido a maior densidade do corpo de prova que apresenta menos espaços vazios disponíveis, ou seja, menor quantidade de poros ou poros de tamanhos menores que dificultam a penetração e difusão da molécula de água nos corpos de prova além disso o rejeito de mineração é composto em sua maioria de quartzo que não absorve água.

A variação dos valores de absorção de água também está relacionada à espécie de fungo utilizada na preparação dos corpos de prova. Os corpos de prova obtidos a partir do

fungo *Ganoderma lucidum* proporcionaram menor absorção de água para os três testes conforme apresentado na tabela 4 e isso pode estar relacionado ao melhor crescimento do fungo *Ganoderma lucidum* as condições de cultivo. Este comportamento provavelmente está relacionado à formação de uma camada quitinosa hidrofóbica externa mais densa (ELSACKER *et al.*, 2019), em comparação com o fungo *Trametes villosa*, justificado pela menor taxa de absorção de água do *Ganoderma lucidum*. Em relação à estatística dos resultados, todas as amostras apresentaram baixos valores de desvio padrão e o erro também foi baixo com exceção para as amostras T1 561 e T3 561 e isso pode ser justificado pela heterogeneidade do corpo de prova uma vez que os fungos não crescem uniformemente da mesma maneira no substrato.

Um comportamento não linear da curva de absorção de água apareceu nos gráficos apresentados neste estudo, isso ocorreu também no estudo realizado por Ziegler *et al.* (2016), segundo ele esse comportamento foi relacionado à natureza hidrofóbica do micélio e à natureza hidrofílica das fibras.

A absorção de água do biocompósito é uma grande preocupação para testar a qualidade e durabilidade do produto, além de afetar o peso e ser considerada uma fonte de deformação do material, pois gera um aumento nas dimensões (GIROMETTA *et al.*, 2001)

5.6.3 Análise termogravimétrica (TGA)

A estabilidade térmica dos corpos de prova está representada pelas curvas de TG (linha em preto) e DTG (linha em azul) que relacionam a perda de massa dos materiais desenvolvidos em função da temperatura na Tabela 5.

Tabela 5- Tabela de valores obtidos por TGA e DTG dos corpos de prova T1 561, T2 561, T3 561 (produzidas com *Trametes villosa*) e T1 601, T2 601 e T3 601 (produzidas com *Ganoderma lucidum*)

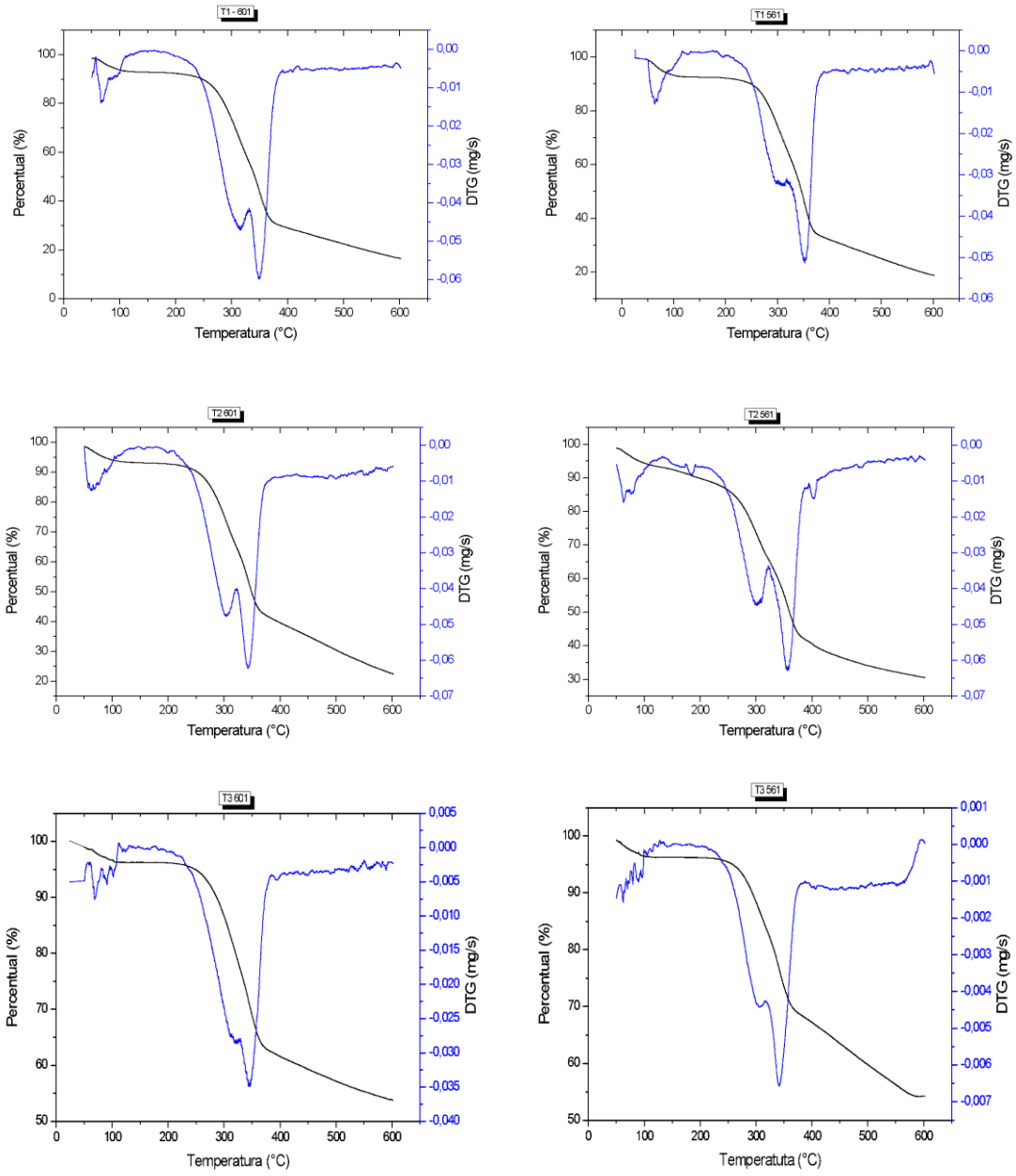
Amostras	Degradação (°C)								
	Primeiro evento			Segundo evento			Terceiro evento		
	T_{onset}	T_{vm}	T_{endset}	T_{onset}	T_{vm}	T_{endset}	T_{onset}	T_{vm}	T_{endset}
T1 601	60,8	66,4	81,6	297,9	315,6	329,5	333,0	349,4	361,1
T1 561	49,3	63,2	92,25	293,6	303,7	319,9	328,8	352,7	364,0
T2 601	50,18	64,3	102,8	289,9	303,9	320,2	326,1	342,4	356,6
T2 561	52,5	63,0	100,5	281,6	300,4	321,4	328,5	356,4	372,8

T3 601	57,2	68,2	80,7	309,8	317,2	330,8	330,8	344,3	356,6
T3 561	54,9	64,3	99,3	299,2	306,3	317,8	323,6	341,3	356,4

Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

O Gráfico 5 mostra a análise termogravimétrica dos diferentes corpos de prova obtidos.

Gráfico 5- Análise termogravimétrica dos corpos de prova T1 561, T2 561, T3 561 (produzidas com *Trametes villosa*) e T1 601, T2 601 e T3 601 (produzidas com *Ganoderma lucidum*)



.

Fonte: Dados da Pesquisa, 2022.

A análise das curvas termogravimétricas mostrou que a perda de massa dos materiais, de maneira geral, ocorre em três etapas diferentes. A primeira etapa ocorre por volta de 100°C e está relacionada à liberação da água presente nos materiais. Nessa temperatura todas as curvas de TG apresentaram um primeiro evento de perda de massa atribuído à umidade dos materiais que provavelmente se trata de água “livre”, ou seja, não fortemente aderida à fibra (SILVA, 2011; PERRONE, 2015).

Na temperatura de aproximadamente 240ºC algumas ligações químicas começam a se desfazer e ocorre o início da desestruturação térmica do material. Nas curvas de DTG (Gráfico 5) esse evento térmico pode ser observado pela presença de um “ombro” na temperatura próxima de 280°C que na literatura está relacionado à decomposição de hemicelulose proveniente do bagaço de cana de açúcar (SILVA, 2011). Em relação ao último evento térmico, observa-se uma perda de massa em temperaturas mais elevadas, próximas a 350°C, que pode ser atribuída a degradação térmica da celulose (PERRONE, 2015).

Os resultados da análise termogravimétrica mostraram padrões de degradação semelhantes para os compósitos miceliais cultivados com substrato e rejeito como nos corpos de prova T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*), T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T3 561 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*) , T2 601 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) e T3 R601 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*). O tipo de fungo (*Trametes villosa* e *Ganoderma lucidum*) não impactou na estabilidade térmica dos materiais.

De acordo com a Tabela 5, não houve ganho de estabilidade térmica ao adicionar o rejeito de mineração, isto pode ocorrer porque a quantidade adicionada foi pequena ou a interação entre os componentes foi baixa.

5.6.4 Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de MEV obtidas da área interna do corpo de prova do compósito baseado em micélio fúngico estão representadas na Figura 12 e Figura 13.

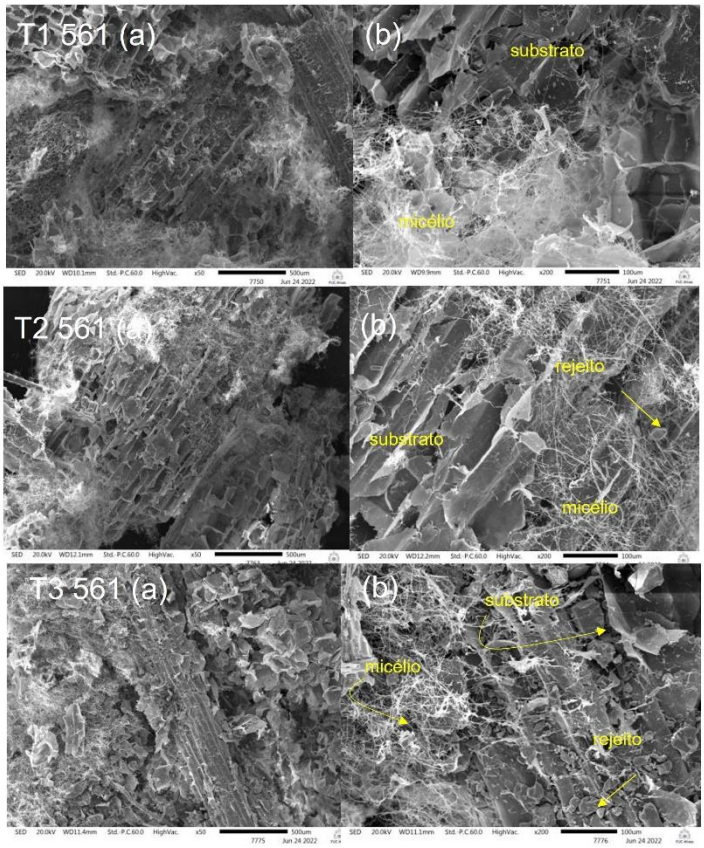


Figura 12- Imagens de MEV da estrutura interna próxima ao centro do compósito baseado em micélio fúngico nas ampliações de 50X (Figuras a) e 200 x (Figuras b) das seguintes composições: T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*), T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), T3 561 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*),

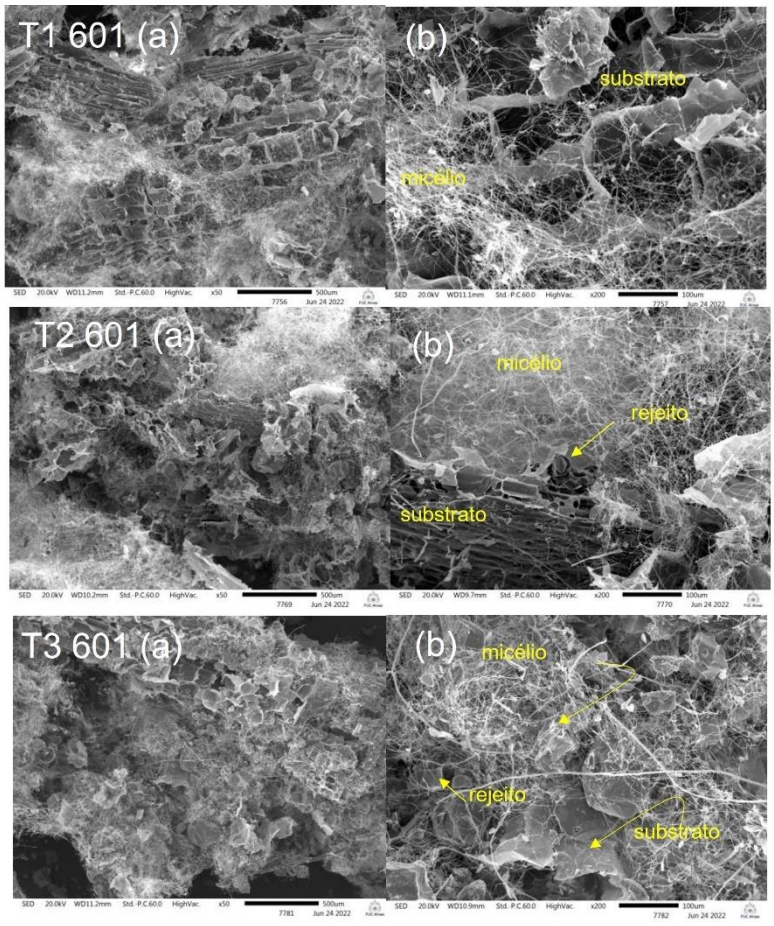


Figura 13- Imagens de MEV da estrutura interna próxima ao centro do compósito baseado em micélio fúngico nas ampliações de 50X (Figuras a) e 200 x (Figuras b) das seguintes composições: T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*) T2 601 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) e T3 601 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*). Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Observa-se nas imagens do MEV referente aos corpos de prova dos compósitos baseados em micélio fúngico a presença das hifas miceliais e as fibras do substrato na Figura 12 -T1 561a, T1601 a, T2 561 a, T2 601 a, T3 561 a e T3 601 a. É possível observar também que a formação de um emaranhado de hifas (micélio) pode ocorrer nos vazios entre os fragmentos dos substratos, promovendo a união entre as fases do compósito. Isso fica mais claro nas imagens ampliadas 200x, representadas na Figura 12- T1 561b, T1601 b T2 561 b, T2 601 b, T3 561 b e T3 601 b. Pelo fato de a ampliação ser menor (50x), com essas imagens é possível verificar uma área maior do corpo de prova e à medida que a ampliação aumenta, em 200 x, observa-se mais detalhes das regiões ampliadas dos corpos de prova.

As imagens de MEV das Figuras 12 e 13- T1 561b, T1601 b T2 561 b, T2 601 b, T3 561 b e T3 601 b mostram o crescimento desordenado e aleatório das hifas dos micélios fúngicos no substrato de bagaço de cana. As regiões em que as hifas estão unidas também podem ser observadas nessas imagens. Nos corpos de prova, T2 561 b, T2 601 b, T3 561 b e T3 601 b, observa-se a presença de fragmentos arredondados distribuídos nas imagens de MEV, indicando presença do rejeito de mineração. Além disso, para esses corpos de prova também se nota que a concentração usada de rejeito de mineração na obtenção do corpo de prova influenciou o crescimento do micélio fúngico. Nos corpos de prova que foram obtidos com maior quantidade de rejeito de mineração, T3 561 e T3 601, observa-se que o crescimento do micélio fúngico foi mais acentuado recobrindo maior área do substrato em comparação com os corpos de prova T2 561 e T2 601 que utilizaram uma quantidade menor de rejeito de mineração. Esse comportamento já havia sido observado nos testes para determinação da melhor quantidade de rejeito para o crescimento dos fungos representados nas Figuras 8, 9 e 10.

O diâmetro médio do filamento das hifas é apresentado na Tabela 6, com objetivo de estimar as propriedades médias das redes formadas a partir dos micélios fúngicos.

Tabela 6- Resultados do diâmetro médio do filamento de hifas para os corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.

Amostras	Diâmetro médio (µm)	Desvio padrão	Erro padrão
T1 – 561	30,5	14,1	1,4
T2 -561	29,5	14,1	1,4
T3 - 561	30,0	14,6	1,4
T1 - 601	26,3	16,4	1,6
T2 - 601	23,1	8,2	0,8
T3 - 601	28,9	13,0	1,3

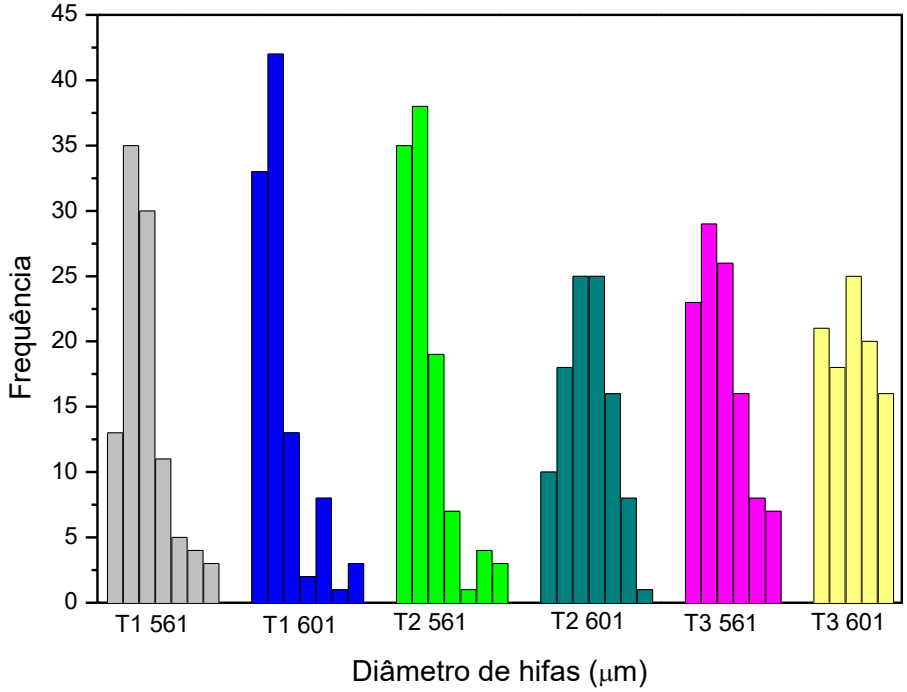
Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Os valores encontrados do diâmetro médio do filamento de hifas dos corpos de prova estudados apresentam-se no intervalo de 23,1-30,5 µm. Esses valores estão dentro da faixa

relatada por Islam e colaboradores (2017) no qual afirmam que as hifas têm valores de diâmetros da ordem de 1–30 µm, dependendo da espécie e do ambiente de crescimento, e que o seu comprimento pode variar de alguns mícrons a vários metros.

As distribuições correspondentes a cada uma das condições testadas são mostradas no Gráfico 6.

Gráfico 6- Comparação entre os valores obtidos de diâmetro das hifas para os corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.



Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

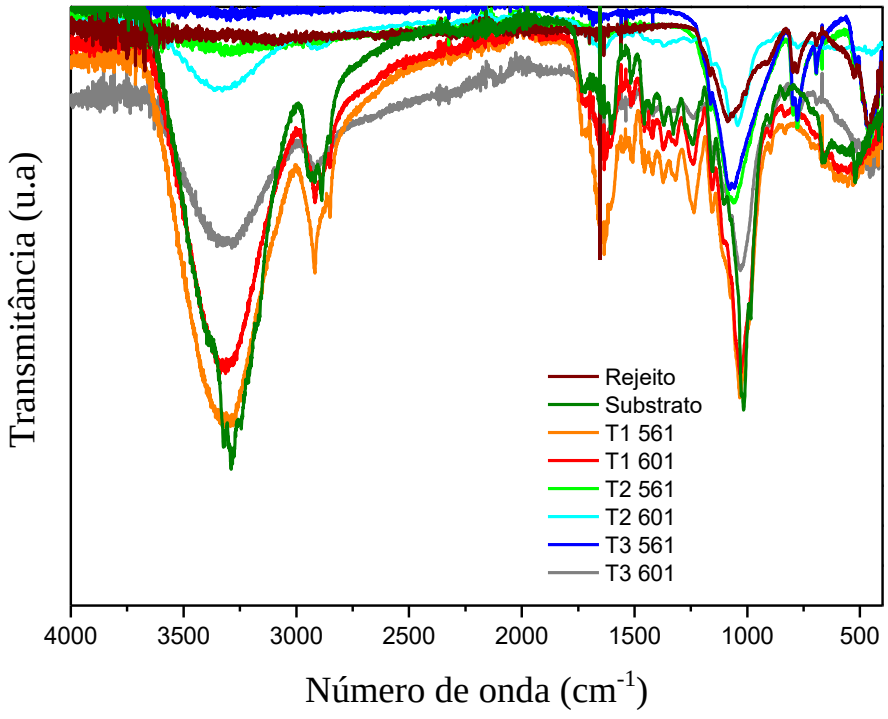
O conjunto de hifas formam o micélio fúngico que exerce um papel fundamental no crescimento dos fungos. As hifas degradam o substrato de cultivo e com isso, são responsáveis pela substituição da biomassa vegetal por biomassa fúngica. A rede micelial promove a ação agregadora das partículas do substrato e confere resistência ao biocompósito formado (SANTOS, 2020).

O tamanho das hifas pode variar influenciando diretamente o crescimento dos micélios. Esse comportamento provavelmente está intimamente ligado às fontes de nutrição do meio, dependendo da interação meio versus isolado fúngico.

5.6.5 Análise Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros infravermelhos para o substrato, o rejeito e os corpos de prova são mostrados no gráfico 7. No espectro de absorção no infravermelho do substrato utilizado no corpo de prova, é possível observar as principais bandas referentes à composição do bagaço de cana nas seguintes regiões: 3300 cm^{-1}, referente à deformação axial do grupo O-H associado principalmente a celulose, 2920 cm^{-1} associada às vibrações de deformação axial do grupo C-H, 1723 cm^{-1} característica da carbonila (C=O) que é atribuída à hemicelulose e em 1423 cm^{-1} referente à deformação simétrica do grupo CH_2 da celulose. As ligações características C-O-C da cadeia da celulose e da lignina aparecem na região de 1242 cm^{-1}. A banda 1160 cm^{-1} pode ser atribuída às ligações C-O de álcoois primários da celulose e 1020 cm^{-1} é referente as ligações C-O-C da vibração do anel de piranase também presente na celulose (RODRIGUES, 2012; ALMEIDA *et al*., 2022; HOI; MARTINCIGH, 2013).

Gráfico 7 - Espectros vibracionais infravermelho do substrato isolado (bagaço de cana de açúcar), aditivo (rejeito de mineração) e dos corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.



Fonte: Dados da pesquisa (2022).

No espectro de FTIR do rejeito de mineração, como mostrado no Gráfico 7, observa-se as bandas em 1082, 1020 e 777 cm^{-1} atribuídas aos modos de vibração de alongamento da rede do SiO_4. Além disso, as bandas que aparecem na região de 580-700 cm^{-1} são associadas as ligações Si-O-M ou M-O, onde M representa elementos como Mg, Al e Fe de outros componentes minerais além do quartzo (DONG *et al*., 2020, FERREIRA *et al*., 2022). Este resultado está de acordo com o que foi discutido no DRX no qual as fases de quartzo e hematita apresentam-se predominantemente no rejeito de mineração.

Os compósitos baseados em micélio com *Ganoderma lucidum* referentes às amostras T1 601, T2 601 e T3 601, e com *Trametes villosa*, T1 561, T2 561 e T3 561 apresentam espectros de FTIR semelhantes. As principais bandas observadas são em 1075 e 1160 cm^{-1} características de (1→3)- e (1→6)-b glucana que estão presentes na parede celular do fungo. As bandas em 780 e 1043 cm^{-1} são também associadas a b-glucana. Em 1313 cm^{-1} observa-se a banda associada a quitina (amida III- alongamento C-N) que é predominante na amostra T1 601 e T1 561. A adição do rejeito de mineração no material, independente da concentração, inibe a presença dessa banda como pode ser visto nos espectros de FTIR de T2 601 e T3 601.

A presença de peptídeos e metabólitos secundários são associados à banda em 1640 cm^{-1}. A banda 2922 cm^{-1} é associada a quitina e ao alongamento C-H que é possível ser observada apenas para as amostras T1 601, T2 601 e T1 561. A região de 3600-3000 cm^{-1} é característica da água residual e CO_2 (estiramento das ligações O-H e N-H) (RIGOBELLO; AYRES, 2022).

Comparando os espectros de FTIR do substrato com os compósitos baseados em micélio colonizado pelos fungos *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa* pode-se observar que as bandas características da celulose (1242 e 1423 cm^{-1}) e hemicelulose (1723 cm^{-1}) presentes no substrato são predominantes na amostra T1 601 e T1561. Na amostra T1 601 e T1 561 obtidas apenas a partir do substrato e do fungo, o desenvolvimento do micélio fúngico é mais discreto, e consequentemente, o substrato é menos consumido pelo fungo e por isso essas bandas aparecem mais intensas. Com isso, é possível reafirmar o potencial dos fungos *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa* para degradar os carboidratos da biomassa vegetal.

Santos 2020, observou resultados semelhantes na colonização do fungo *P. sanguineus* nos substratos de farelo de trigo e pó de coco. Outro trabalho que descreveu resultados semelhantes foi desenvolvido por Ramírez-Chan et al, que analisaram o efeito do crescimento

do fungo basidiomiceto *P. chrysosporium* na fibra natural do compósito vegetal.

Em relação as amostras contendo rejeito de mineração observa-se que em T3 601 as bandas características da celulose (1242 e 1423 cm^{-1}) e hemicelulose (1723 cm^{-1}) presentes no substrato aparecem alargadas e com menor intensidade e na T2 601 não é possível identificá-las. Em T2 601 e T3 601 essas bandas também não foram identificadas. De maneira geral, esse comportamento sugere que a adição do rejeito de mineração favorece o crescimento do micélio fúngico e com isso os componentes celulósicos do substrato são consumidos intensamente.

Os resultados observados nos testes para determinação da quantidade de rejeito para melhor crescimento dos fungos são semelhantes ao que foi observado no FTIR. O crescimento mais intenso do micélio fúngico com o *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa* na presença do rejeito de mineração provavelmente está associado à disponibilidade dos íons ferro presentes no rejeito. É conhecido que basidiomicetos são fungos capazes de bioacumular ferro e metais como cobre, cádmio, zinco entre outros em sua estrutura (MENIQUETI *et al*; 2020). Os íons ferro, particularmente, são importantes no crescimento e replicação dos fungos sendo necessário uma alta demanda de ferro para atuar nos processos metabólicos desses seres vivos (UMEO *et al*., 2020). Meniquetti *et al.* (2020) observou que o fungo *Ganoderma lucidum* produziu 1,3 vezes mais biomassa micelial na presença de íons ferro comparado ao grupo controle. Em seu trabalho foi observado o efeito do ferro em diferentes concentrações no crescimento de outros fungos além do *G. lucidum* e pode-se concluir que cada fungo responde de forma diferente ao teor de ferro no meio de cultura.

Os resultados de FTIR para as amostras T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*) e T3 561 (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*), sugerem que em ambas as concentrações de rejeito de mineração utilizadas o crescimento do fungo foi acentuado apresentando maior consumo do substrato. Portanto, pode-se sugerir que o *Trametes villosa* apresenta maior capacidade de degradar a fração de fibra natural do substrato na presença do rejeito de mineração do que o *Ganoderma lucidum*.

Os resultados de FTIR também mostram que a concentração dos íons ferro no meio poderá influenciar o crescimento do micélio fúngico, pois quando foi utilizado o rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*, amostra T3 601, o crescimento do micélio fúngico foi menor do que na amostra T2 601 no qual foi obtida com

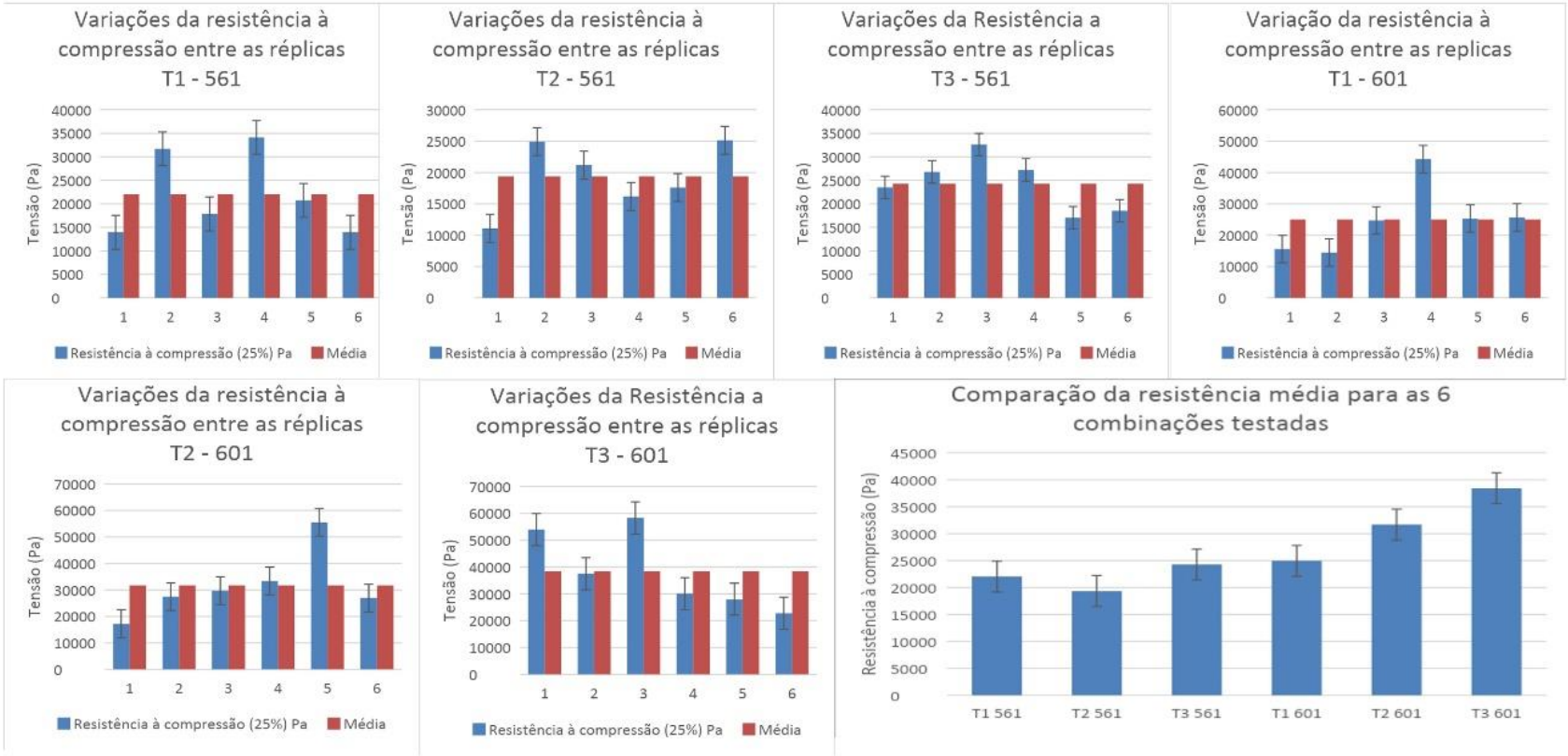
rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*. Esse efeito provavelmente está associado ao fato de metais poderem atuar como potentes oxidantes com danos ao metabolismo fúngico, principalmente quando usados em concentrações superiores a capacidade de bioacumulação (COMENSOLI *et al*., 2016). A redução da biomassa micelial produzida pelo fungo basidiomicetos *P. ostreatus* na presença do ferro e zinco também foi observada por Umeo e colaboradores, no qual associaram este comportamento a diferença nas cepas do fungo.

5.6.6 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi realizado para os corpos de prova obtidos neste estudo. A resistência compressiva e o módulo de elasticidade foram obtidos a partir das equações 2 e 3 indicadas pela norma ASTM C165 − 07 e são apresentadas no Gráfico 8.

É conhecido na literatura que a resistência mecânica aumenta com o aumento da densidade e o aumento da umidade provoca uma redução na resistência do material (MARKWARDT; WILSON, 1935). Em relação a densidade, já foi discutido que os corpos de prova obtidos com adição do rejeito de mineração apresentam maior densidade. E a densidade aumenta com o aumento da proporção do rejeito/substrato. Esta característica provavelmente está associada ao desempenho mecânico dos corpos de prova obtidos a partir do fungo *Ganoderma lucidum* (T1 601, T2 601 e T3 601). Para estes corpos de prova o aumento da densidade ocorreu na presença de aditivos (rejeito de mineração) que ocuparam os espaços vazios entre as fibras e, os poros podem ter sido em sua maioria preenchidos. Outro fator que deve ser considerado é o crescimento mais acentuado do micélio fúngico à medida que aumenta a proporção de rejeito de mineração, tornando o material mais compacto. Todos esses fatores juntos, provavelmente, atuaram para aumentar a resistência a compressão desses corpos de prova. Aliado a isto, deve-se considerar a baixa absorção de água nos corpos de prova (T1 601, T2 601 e T3 601) que só foi observado devido a compactação do compósito o que levou a um aumento de densidade e provavelmente a presença de poucos poros disponíveis para a difusão da água. O mesmo comportamento foi relatado por Islam e colaboradores (2018) que observaram uma relação entre a resistência mecânica e a densidade do material que, de acordo com seus ensaios, quanto maior a densidade (0,03-0,05 g.cm- ^{3}), maior foi a resistência à compressão (40-80 kPa).

Gráfico 8 - Análise da resistência compressiva das réplicas no ensaio de compressão para os corpos de prova produzidos T1, T2, T3 com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.



Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Para os corpos de prova obtidos a partir do *Trametes villosa* (T1 561, T2 561 e T3 561) o fato da resistência a compressão não ter variado consideravelmente entre os compósitos provavelmente está associado a maior absorção de água em sua estrutura, embora também fosse observado o aumento no valor da densidade com a presença do rejeito de mineração. Nestes materiais, provavelmente os espaços vazios não foram preenchidos, em sua maioria, na presença do rejeito de mineração ou ocorreu a formação de poros com dimensões maiores. Sendo assim, estas estruturas podem apresentar como pontos de fragilidade nos corpos de prova resultando em um menor valor de resistência a compressão.

A resistência à compressão é uma das caracterizações majoritariamente realizadas para os compósitos baseados em micélio fúngico uma vez que o maior interesse em pesquisas tem sido o desenvolvimento de novos materiais. Para tal, dependendo do tipo de substrato de cultivo, do isolado fúngico, das condições de crescimento e de processamento, o biocompósito pode apresentar também propriedades como resistência mecânica elevada e baixa densidade e quanto a aplicação, este material pode ser associado ao comportamento do poliestireno expandido (EPS) e outras espumas (APPELS *et al*., 2019). Segundo Girometta et al. (2019) a resistência à compressão para micocompósitos, quando se utilizam substratos como polpa de serragem macerada, grão de milho, farelo de trigo e fibra natural, varia consistentemente entre 29 kPa e 567 kPa, valores altamente competitivos com diversas categorias de poliestireno expandido (EPS) que apresentam uma resistência entre 20 kPa e 700 kPa. O mesmo autor indica que a seleção do substrato e da espécie fúngica utilizada tem um papel muito importante no desempenho compressivo (GIROMETTA *et al.*, 2019). Em um outro estudo realizado por Yang; Park; Qin (2021), a maior densidade dos biocompósitos baseados em micélio fúngico, utilizando vários tipos de substrato incluindo polpa de madeira, grão de milho, e farelo de trigo colonizados pelo fungo I. lacteus também levou a um alto módulo de Young e resistência mecânica. E segundo Ziegler *et al*. (2016), o tipo de resíduo (ou até mesmo a combinação entre diversos tipos de resíduos) e a espécie do fungo utilizado na produção do biocompósito, podem alterar diversas propriedades mecânicas do material, incluindo a resistência à compressão.

Os valores dos módulos de elasticidade (Young) dos corpos de prova obtidos neste trabalho estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7- Tabela de valores obtidos para o módulo de elasticidade dos corpos de prova T1, T2, T3 produzidos com os dois tipos de fungos, *Ganoderma lucidum* e *Trametes villosa*.

Amostras	Módulo de elasticidade Pa (módulo de Young)
T1 561	88206
T1 601	77386
T2 561	97119
T2 601	99918
T3 561	126731
T3 601	153730

Fonte: Dados da pesquisa, 2022.

Na Tabela 7 observa-se um aumento do módulo de elasticidade nos corpos de prova preparados na presença do rejeito de mineração e no aumento da proporção rejeito/substrato tanto para os compósitos obtidos com *Ganoderma lucidum* (T1 601, T2 601 e T3 601) quanto para os obtidos a partir do fungo *Trametes villosa* (T1 561, T2 561 e T3 561). Para os corpos de prova contendo apenas o substrato e o fungo, o módulo de elasticidade foi de 88 kPa e 77 kPa para T1 561 (somente bagaço com *Trametes villosa*) e T1 601 (somente bagaço com *Ganoderma lucidum*), respectivamente. Este valor aumentou significativamente quando o rejeito de mineração foi adicionado nas amostras na proporção 0,5:1 rejeito/substrato nas amostras T2 561 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*) apresentando valor de 97 kPa e T2 601 (rejeito de mineração na proporção de 0,5:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) com valor de 99 kPa. Por último, verifica-se que o módulo de elasticidade passou para 126 kPa (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Trametes villosa*) e 153 kPa (rejeito de mineração na proporção de 2:1 (g/g) e bagaço com *Ganoderma lucidum*) quando a proporção do rejeito/substrato foi de 2:1.

Portanto, os resultados apresentados mostram que o aumento do módulo de elasticidade está relacionado com adição do rejeito de mineração nos corpos de prova. Como já foi visto no teste para determinação da melhor quantidade de rejeito para o crescimento dos fungos, a presença do rejeito de mineração leva a um crescimento mais intenso do micélio e este fato, provavelmente conferiu maior rigidez ao compósito levando ao aumento do módulo de elasticidade.

O comportamento observado nas diferenças dos valores do módulo de elasticidade já

era esperado uma vez que na produção de biocompósito e biopolímero, o emprego do micélio produz um aumento do módulo de elasticidade e consequentemente rigidez do material (TÉLLEZ-TÉLLEZ *et al*., 2016). A colonização das hifas em um substrato resulta na formação de uma rede micelial densa que pode impactar nas respostas mecânicas. As hifas podem ser responsáveis por proporcionar estabilidade ao substrato e garantir resistência mecânica, pois interagem aleatoriamente e formam uma estrutura de rede que atua como uma cola natural, ligando os substratos e formando um material composto (LEE *et al*., 2012). Como o crescimento do micélio no substrato é aleatório, este processo induz um padrão de estrutura interna anisotrópica (GLUDOVATZ *et al*., 2017). Outro fator que influência as propriedades mecânicas estão relacionadas ao tipo de fungo utilizado como verificado por Rocha e colaboradores (2020) no qual observaram que, a espécie *Trametes versicolor* tem maior resistência à compressão do que *Pleurotus ostreatus* até quando cultivado no mesmo substrato. Segundo os autores, isto ocorre devido ao tipo de hifas (monomíticas para *Pleurotus* e trimíticas para *Trametes*) apresentada por cada espécie. Os mesmos autores relacionaram a adição de fibras naturais ao substrato utilizado (polpa de serragem de bétula) a capacidade de aumentar o desempenho mecânico do biocompósito produzido uma vez que as fibras têm a capacidade de aumentar a rigidez e minimizar possíveis fissuras na superfície do biocompósito durante o teste de resistência à compressão (ROCHA *et al*., 2020).

6 CONCLUSÃO

Neste estudo, foram desenvolvido compósitos à base de micélio fúngico com fibras de reforço lignocelulósicas (bagaço de cana de açúcar) combinadas com fungos de podridão branca, *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (CCMB 601) e *Trametes villosa* (CCMB 561), utilizando diferentes proporções de rejeito de mineração como aditivo.

Evidenciou-se que o material à base de micélio é inativado pelo calor após o processo de crescimento. Foram determinadas as linhagens fúngicas e as concentrações de rejeito de mineração utilizadas para o presente estudo, os corpos de prova foram produzidos e analisados em relação a sua densidade, capacidade de absorção de água, análise termogravimétrica, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e foi realizado o ensaio de compressão.

O uso de rejeito impactou de forma significativa na densidade, mas o tipo de fungo não gerou diferença para essa análise. Com relação à absorção de água, o *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst (CCMB 601) teve um melhor desempenho, pois foi responsável por uma menor absorção de água. Os resultados da análise termogravimétrica mostraram padrões de degradação semelhantes para os materiais miceliais cultivados com substrato e rejeito. A análise pela microscopia eletrônica de varredura evidenciou que a concentração usada de rejeito de mineração na obtenção do corpo de prova influenciou o crescimento do micélio fúngico. A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) sugere que a adição do rejeito de mineração favorece o crescimento do micélio fúngico e com isso os componentes celulósicos do substrato são consumidos intensamente. Os corpos de prova obtidos a partir do fungo *Ganoderma lucidum* (T1 601, T2 601 E T3 601) tiveram maior desempenho mecânico.

Como perspectiva futura sugere-se que sejam feitas mais analises para caracterização dos materiais obtidos para indicar a aplicabilidade do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALMADA, B. S. *et al*. Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, Brasil, v. 18, p. 1947–1962, May-June. 2022.

ALMEIDA M. S. *et al*. Iron bioaccumulation in mycelium of Pleurotus ostreatus. **Brazilian Journal of Microbiology**, [S. l.], v. 46, n. 1, p. 195-200, Jan-Mar. 2015.

ALMEIDA R. A. *et al*. Photocatalytic oxidation of textile dye using sugarcane bagasse-Nb2O5 as a catalyst. **Journal of Photochemistry &amp, Photobiology, A: Chemistry**, [S. l.], v. 432, 1 Nov. 2022.

APPELS, F. V. W. *et al*. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. **Materials and Design**, [S. l.], v. 161, p. 64–71, 5 Jan. 2019a. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027.

ARIFIN, Y. H.; YUSUF, Y. Mycelium Fibers as New Resource for Environmental Sustainability. **Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology, MUCET,** [S. l.], v. 53, p. 504–508, 1 Jan. 2013.

ATTIAS, N. *et al.* Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis. **Journal of Cleaner Production,** [S. l.], v. 246, Feb. 2020.

AUGUSTO, T. D. M. *et al.* Iron ore tailings as catalysts for oxidation of the drug paracetamol and dyes by heterogeneous Fenton. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. l.], v. 6, n. 5, p. 6545–6553, out. 2018.

BARI, E. *et al.* Comparison between degradation capabilities of the white rot fungi Pleurotus ostreatus and Trametes versicolor in beech wood. **International Biodeterioration and Biodegradation**, [S. l.], v. 104, p. 231–237, out. 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/ 10.1016/j.ibiod.2015.03.033.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência dos materiais.** 8.ed. [S.l: s.n.], 2012.

CASTELLANI, A. Maintenance and cultivation of common pathogenic fungi of man in sterile distilled water**. Journal of Tropical Medicine and Hygiene**, [S. l.], v. 70, p. 181- 184, 1967.

CECHIN, L. *et al*. Ceramics composites from iron ore tailings and blast furnace slag. **Ceramics International**, [S. l.], v. 48, n. 8, p. 10506–10515, Apr. 2022.

CERIMI, K. *et al.* Fungi as source for new bio-based materials: A patent review. **Fungal Biology and Biotechnology,** [S. l.], v. 6, n. 1, p. 1–10, Oct. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s40694-019-0080-y.

COMENSOLI L. *et al.* Iron and fungal physiology: a review of biotechnological opportunities. **Advances in Applied Microbiology**, [S. l.], v. 98, p. 31–60, 2016.

COURA, R. I**. Avaliação do processamento de compósitos baseados em polietileno de alta densidade e rejeito de mineração de ferro.** 2018. 72f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-graduação multicêntrico em química, Departamento de Química, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

DONG G. *et al.* Mesoporous zinc silicate composites derived from iron ore tailings for highly efficient dye removal: Structure and morphology evolution. **Microporous and Mesoporous Materials**, [S. l.], v. 305, Oct. 2020.

ELSACKER, E. *et al.* Caracterização mecânica, física e química de compósitos à base de micélio com diferentes tipos de substratos lignocelulósicos. [S. l.], mar. 2019a.

ELSACKER, E. *et al.* Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. **BioRxiv**, [S. l.], p.1-24, mar. 2019b. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1101/569749.

FERREIRA C. I. *et al*. Reuse of iron ore tailings for production of metakaolin-based geopolymers. **Journal of Materials Research and Technology**, [S. l.], v. 18, p. 4194-4200, maio-jun. 2022.

FRANCO, L. C. *et al.* Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. *In:* **ANAIS DO 56 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, ISSN, 2014, [S.l: s.n.], p. 2175–8182, 2014.

GIROMETTA, C. *et al.* Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: A review. **Sustainability,** Switzerland, v. 11, n. 2, Jan. 2019.

GOMES, A. C. F. **Estudo de Aproveitamento de Rejeito de Mineração**. 2017. 84f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Metálurgica, Materiais e de Minas, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: https://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/2514M.PDF.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011. 114f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Metálurgica, Materiais e de Minas, Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

GLENN, K. J.; GOLD, H. M. Decolorization of several polymeric dyes by the lignindegrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. **Applied and Environmental Microbiology,** [S. l.], v. 45, n. 6, p. 1741-1747, June 1983.

GLUDOVATZ, B. *et al*. Multiscale structure and damage tolerance of coconut shells. Journal **of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 76, 2017.

HANEEF, M. *et al.* Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. **Scientific Reports**, [S. l.], v. 7, p. 1–11, Jan. 2017a.

HANEEF, M. *et al.* Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. **Scientific Reports,** [S. l.], v. 7, p. 1–11, Dec. 2017b. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1038/srep41292.

HOI S. W. L; MARTINCIGH S. B. Sugar cane plant fibres: Separation and characterisation. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], v. 47, p. 1-12, May. 2013.

HOLT, G. A. *et al.* Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: Evaluation study of select blends of cotton byproducts. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, [S. l.], v. 6, n. 4, p. 431–439, Nov. 2012.

HUANG, X.; RANADE, R.; NI, W.; LI, V. C. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 44, p. 757–764, July. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. **Gestão e manejo de rejeitos de mineração.** 1.ed. Brasília: IBRAM, 2016.

ISLAM, M. R. *et al.* Mechanical behavior of mycelium-based particulate composites. **Journal of Materials Science**. [S. l.], v. 53 p. 16371-16382, Aug. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10853-018-2797-z.

LEE, M. H.; CHAO, C. H.; LU, M. K. Effect of carbohydrate-based media on the biomass, polysaccharides molecular weight distribution and sugar composition from Pycnoporus sanguineus, **Biomass and Bioenergy**, p. 37-43, 2012.

LINO, A. G. Composição Química a Estrutural da Lignina e Lipídios do Bagaço e Palha da Cana-De-Açúcar. 2015. 97f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa, 2015. Disponível em: https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/8522/1/texto%20completo.pdf.

MACARTHUR, E. Growth within: a circular economy vision for a competitive europe. **Ellen MacArthur Foundation**, [S. l.], p. 100, 2015.

MARWARDT, L. J.; WILSON, T. R. C. Strength and related properties of woods grown in the United States. **U. S. Dep. Agr. Tech. Bull**. Washington, D.C., v. 479, n. 67, 1935.

MENEZES, T. A. *et al.* Production of Basidiomata and Ligninolytic Enzymes by the Lingzhi or Reishi Medicinal Mushroom, Ganoderma lucidum (Agaricomycetes), in Licuri (Syagrus coronata) Wastes in Brazil. **Cogumelos Int J Med**, v. 18, n. 12, p. 1141-1149. 2016

MENIQUETI B. A. *et al*. Iron-enriched mycelia of edible and medicinal basidiomycetes. **Environmental Technology,** [S. l.], v. 43, p. 1248-1254, Sept. 2020.

MEYER, V. *et al.* Crescendo uma economia circular com biotecnologia fúngica: um white paper. **Biologia Fúngica e Biotecnologia**. [S. l.], v. 7, p. 1-23, Apr. 2020. doi.org/10.1186/s40694-020-00095-z.

MEYER, V. Conectando as ciências dos materiais com a biologia dos fungos: um mar de possibilidades. **Biologia e Biotecnologia de Fungos**. [S. l.], v. 9, p. 2-4, mar. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s40694-022-00137-8.

POHL, C. *et al.* Establishment of the basidiomycete Fomes fomentarius for the production of composite materials. **Fungal Biology and Biotechnology**, [S. l.], v. 9 p. 1–13, Feb. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1186/s40694-022-00133-y.

RAMIREZ-CHAN E. D. *et al.* Effect of accelerated weathering and Phanerochaete crysosporium on the mechanical properties of a plastic composite prepared with discarded coir and recycled HDPE. **Bioresources**, [S. l.], v. 9, p. 4022-4037, 2014.

RIGOBELLO A.; AYRES P. W. L. Compressive behaviour of anisotropic myceliumbased composites. **Nature Scientific Reports**, [S. l.], v. 12, p.1-13, Apr. 2022.

ROCHA, M. I. *et al.* Desenvolvimento de biocompósitos fúngicos utilizando resíduos industriais Fungal biocomposites development from industrial waste. **Revista Matéria**, [S. l.], v. 25, n. 04, p. 1-12, ago. 2020.

RODRIGUES, N. L. **Espectroscopia por FTIR de variedades híbridas de bagaço de cana-de- açúcar pré-tratados para produção de etanol celulósico**. 2012. 144f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em física, Departamento de Física, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2012.

SANTOS, S. I. **Caracterização e análise mecânica de biocompósito de matriz micelial e reforço vegetal para uso como material biodegradável.** 2020. 111f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-graduação em ciências e engenharia de materiais, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2020.

SIERRA, B. A. L. **Desenvolvendo micocompósitos a partir de aditivos e rejeitos minerais, resíduos agrícolas e isolados da família Ganodermataceae (Fungi, Basidiomycota) de origem brasileira.** 2022. 199f. Tese (Doutorado)- Programa de Pós-graduação em Microbiologia. Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2022.

SILVA, R. C. F. *et al.* Use of iron mining tailings from dams for carbon nanotubes synthesis in fluidized bed for 17α-ethinylestradiol removal. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 260, May. 2020.

TÉLLEZ-TÉLLEZ, M. *et al*. Mycosphere Essay 11: Fungi of Pycnoporus: morphological and molecular identification, worldwide distribution and biotechnological potential, **Mycosphere**, 2016.

UMEO H. S. *et al*. Iron or zinc bioaccumulated in mycelial biomass of edible basidiomycetes. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, [S. l.], v. 92, n. 2, p. 1-10, Mar. 2020.

VALGINHAK, D. A.; DALLA SANTA, H. S. Potencial de utilização de resíduos da indústria papeleira como substratos para cultivo de Ganoderma lucidum (Reishi). **Revista Agrogeoambiental,** [S. l.], v. 10, n. 3, p.9-23, jul./set. 2018.

WESENBERG, D.; KYRIAKIDES, I.; AGATHOS, S. N. White-rot fungi and theirenzymes for the treatment of industrial dye effluents. **Biotechnology Advances**, New York, v. 22, n. 1, p. 161-187, Dec. 2003.

YAMANAK, R.; MACHADO, G. M. K. Influência do corante Azul Brilhante de Remazol R sobre o sistema enzimático ligninolítico de *Psilocybe castanella* CCB444 em meio de cultivo sintético. **Revista Brasileira de Biociências**, [S. l.], v.5, n.2, p. 1119-1121, jul.2007.

YANG, C.; CUI, C.; QIN, J.; CUI, X. Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 70, p. 36–42. Nov.2014

YANG, L.; PARK, D.; QIN, Z. Material Function of Mycelium-Based Bio-Composite : A Review. **Front. Mater.**, [S. l.], v. 8, p. 1–17, Sept. 2021.

YANG, Z. (JOEY) *et al*. Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 29, n. 7, July 2017.

YELLISHETTY, M.; KARPE, V.; REDDY, E. H.; SUBHASH, K. N.; RANJITH, P. G. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 52 n. 11, p. 1283–1289, Sept. 2008

ZHANG, N.; TANG, B.; LIU, X. Cementitious activity of iron ore tailing and its utilization in cementitious materials, bricks and concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 288, June 2021.

ZIEGLER, A. R. *et al.* Evaluation of physico-mechanical properties of mycelium reinforced green biocomposites made from cellulosic fibers. **Applied Engineering in Agriculture**, [S. l.], v. 32, n. 6, p. 931–938, Dec. 2016.