



Universidade Federal do Rio de Janeiro

O uso do micélio na Arquitetura

Avaliação do seu potencial como isolante térmico em edificações

Joyce de Deus Pires Teixeira

2025



O uso do micélio na Arquitetura

Avaliação do seu potencial como isolante térmico em edificações

Joyce de Deus Pires Teixeira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa: Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Orientador: Lucas Rosse Caldas

Rio de Janeiro
Fevereiro/2025

O uso do Micélio na Arquitetura:

Avaliação do seu potencial como isolante térmico em edificações

Joyce de Deus Pires Teixeira

Orientador: Lucas Rosse Caldas

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa: Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Aprovada por:

Presidente, Prof. Dr. Lucas Rosse Caldas

Prof. Dr. Thiago Melo Graboys (PROARQ/UFRJ)

Prof. Dra. Eliana Flavia Camporese Servulo (Escola de Química/UFRJ)

Dra. Rayane de Lima Moura Paiva (COPPE/UFRJ)

Rio de Janeiro
Fevereiro/2025

ATA DA 715ª DEFESA DE DISSERTAÇÃO

PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ARQUITETURA – M.Sc.

DATA	26/02/2025	LOCAL	https://meet.google.com/cmz-gybh-vux	HORA DE INÍCIO	09:00
------	------------	-------	---	----------------	-------

CANDIDATO(A) Joyce de Deus Pires Teixeira

ORIENTADOR(A) Lucas Rosse Caldas

COORDINADOR(A) _____

BANCA EXAMINADORA

1 Dr. Lucas Rosse Caldas (Presidente – Orientador – PROARQ/UFRJ)

2 Dr. Thiago Melo Graboys (PROARQ/UFRJ)

3 Dra. Rayane de Lima Moura Paiva (PEC/COPPE/UFRJ)

4 Dra. Eliana Flavia Camporese Servulo (EQ/UFRJ)

5 _____

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO

O uso do Micélio na Arquitetura: Avaliação do seu potencial como isolante térmico em edificações.

OBS:

Em sessão única, após exposição de cerca de 35 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Banca, tendo como resultado:



APROVAÇÃO



EM EXIGÊNCIA
(EXIGÊNCIAS CONSTANTES DA FOLHA DE EXIGÊNCIAS, EM ANEXO)



REPROVAÇÃO

No caso de banca realizada com participação(ões) por videoconferência a presente ata é abaixo-assinada somente pelo presidente, devendo ser concordada por meio e-mail por todos os membros, conforme a **Resolução CEPG/UFRJ Nº 128, de 11 de novembro de 2022**.

Presidente _____

Candidato(a) _____

CIP - Catalogação na Publicação

T266u Teixeira, Joyce de Deus Pires
O uso do micélio na Arquitetura: Avaliação do seu potencial como isolante térmico em edificações / Joyce de Deus Pires Teixeira. -- Rio de Janeiro, 2025.
105 f.

Orientadora: Lucas Rosse Caldas.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, 2025.

1. micélio. 2. biomateriais. 3. economia circular. 4. método experimental. 5. simulação computacional. I. Caldas, Lucas Rosse , orient. II. Título.

“A coexistência é o símbolo dos tempos novos”.

Lúcio Costa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que me deu energia e determinação para concluir não só este trabalho, mas todos os desafios encontrados ao longo da minha vida.

À minha família, que sempre me incentivou na realização dos meus projetos pessoais, me dando todo o suporte para que eu continue prosperando como pessoa e profissional.

Ao meu esposo, por tudo, pela paciência, amor, incentivo e cuidado diário. Por ser a minha paz em dias difíceis, o meu porto seguro.

Aos meus avós, em especial a minha avó Cleide (*in memory*), que sempre torceram e oraram por mim em todo meu processo de mudança para o Rio de Janeiro.

Ao meu orientador, Lucas Caldas, pela sua disponibilidade, paciência e atenção dedicados a elaboração deste trabalho. Agradeço também à banca examinadora, em especial, a professora Eliana e a Rayane, por terem aberto às portas dos seus respectivos laboratórios, por todo auxílio, ensinamentos e sugestões que aperfeiçoaram ainda mais o desenvolvimento deste trabalho.

Aos pesquisadores e técnicos do NUMATS e da Escola de Química/UFRJ que me ajudaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido através da bolsa de estudo.

Por fim, à Universidade Federal do Rio de Janeiro, especialmente ao PROARQ e todos os professores do curso de Pós-Graduação em Arquitetura, que me ensinaram e incentivaram durante esses últimos anos, contribuindo na formação de uma profissional de excelência.

RESUMO

O uso do Micélio na Arquitetura:

Avaliação do seu potencial como isolante térmico em edificações

Joyce de Deus Pires Teixeira

Orientador: Lucas Rosse Caldas

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

O setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) é reconhecido por sua significativa contribuição para o consumo energético global e emissões de CO₂. Em resposta a essa problemática, a busca por materiais de construção mais eficientes e com menor impacto ambiental tem se intensificado. O micélio, um material derivado de fungos, emerge como uma alternativa promissora, apresentando características como biodegradabilidade, baixo consumo de energia elétrica em sua produção e capacidade de aproveitamento de resíduos. Diante disso, a pesquisa teve como principais objetivos: (1) mapear o estado da arte do micélio na construção civil, buscando compreender as vantagens, limitações e aplicações do material; (2) desenvolver um método experimental para produção de uma lã isolante de micélio, utilizando a espécie *Pleurotus ostreatus* e a casca de café, e realizar ensaios para determinar as propriedades físicas do biomaterial, como a massa específica aparente, teor de umidade e condutividade térmica; (3) avaliar o desempenho termoenergético do material, por meio de simulações computacionais, em uma edificação de escritórios considerando os cenários climáticos de Curitiba e Fortaleza. Os resultados obtidos revelaram que o micélio desenvolvido apresentou valores médios de 292,35 kg/m³ para massa específica aparente e 0,07 W/m·K para condutividade térmica, e uma economia energética de 39% na simulação com micélio presente apenas no forro, evidenciando o potencial do biomaterial como possível substituto de isolantes térmicos convencionais, como a lã de rocha. Em suma, a presente pesquisa representa um avanço no estudo do micélio como material de construção sustentável, contribuindo para a diminuição de lacunas de conhecimento no setor, especialmente no contexto brasileiro.

Palavras-chave: micélio; biomateriais; economia circular; método experimental; simulação computacional.

Rio de Janeiro

Fevereiro/2025

ABSTRACT

The use of mycelium in Architecture:

Evaluation of its potential as a thermal insulator in buildings

Joyce de Deus Pires Teixeira

Orientador: Lucas Rosse Caldas

Abstract da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

The Architecture, Engineering, Construction, and Operation (AECO) sector is recognized for its significant contribution to global energy consumption and CO₂ emissions. In response to this issue, the search for more efficient building materials with less environmental impact has intensified. Mycelium, from fungi, emerges as a promising alternative, exhibiting characteristics such as low energy consumption in its production, biodegradability, and the ability to utilize waste. In view of this, the main objectives of this research were to: (1) map the state of the art of mycelium in civil construction, seeking to understand the advantages, limitations and applications of the material; (2) to develop an experimental method for the production of an insulating mycelium wool, using the *Pleurotus ostreatus* and coffee husks, to determine the physical properties of the biomaterial, such as density and thermal conductivity; (3) evaluate the thermo-energetic performance of the mycelium, using computer simulations, in an office building considering the climate scenarios of Curitiba and Fortaleza. The results obtained showed that the mycelium blocks had average values of 292.35 kg/m³ for specific mass and 0.07 W/m·K for thermal conductivity, and an energy saving of 39% in the simulation with mycelium present only in the plaster lining, highlighting the material's potential as a possible substitute for conventional thermal insulators, such as rock wool. At last, this research represents an advance in the study of mycelium as a sustainable construction material, contributing to the reduction of knowledge gaps in the sector, especially in the Brazilian context.

Keywords: mycelium; biomaterials; circular economy; experimental protocol; computational simulation.

Rio de Janeiro

Fevereiro/2025

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
SUMÁRIO	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiv
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo Geral.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Estrutura da dissertação	3
Capítulo 2	4
Referencial teórico	4
2.1. A sustentabilidade e a crise climática.....	4
2.2. Edificações sustentáveis.....	5
2.3. Os biomateriais de construção	7
2.4. O Micélio	9
2.4.1. A importância dos fungos e sua estrutura	9
2.4.2. Uma nova alternativa construtiva.....	11
Capítulo 3	14
Revisão Sistemática da Literatura	14

3.1. Principais materiais constituintes dos experimentos.....	19
3.2. Modo de produção, caracterização e principais propriedades	21
3.3. Principais aplicações na Arquitetura.....	26
3.3.1. Impressão 3D com micélio	28
3.3.2. Bioespumas com micélio.....	30
3.3.3. Concreto à base de micélio	31
3.4. Avaliação do ciclo de vida (ACV)	33
CAPÍTULO 4	35
Método experimental	35
4.1. Contextualização e objetivos.....	35
4.2. A escolha dos materiais constituintes.....	35
4.3. Caracterização da casca de café	37
4.3.1. Caracterização física.....	38
4.3.2. Caracterização microestrutural (MEV)	41
4.3.3. Caracterização química	41
4.4. Desenvolvimento da lã isolante de micélio	44
4.4.1. Propriedades físicas da lã isolante de micélio.....	49
4.4.2. Propriedades Microestruturais da lã isolante de micélio.....	52
4.5. Resultados e Discussão	53
4.5.1. Caracterização da casca de café.....	53
4.5.2. Caracterização da lã isolante de micélio.....	57
CAPÍTULO 5	61
Simulação computacional termoenergética	61
5.1. Contextualização e Objetivo	61

5.2. Método e sistemas avaliados.....	62
5.3. Resultados e Discussão	67
CAPÍTULO 6	72
Considerações Finais	72
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos utilizados no capítulo 3, 4 e 5 da dissertação.....	3
Figura 2- O potencial de armazenamento de carbono em comparação com as emissões de berço ao portão, associadas à fabricação por kg de material	9
Figura 3 - Micélio constituído por hifas, desenvolvendo um cogumelo (estrutura reprodutiva).....	10
Figura 4 – Bloco final pós crescimento fúngico e desidratação.	12
Figura 5 – Critérios adotados para a revisão da literatura.	15
Figura 6 – Publicações sobre micélio na construção nos últimos 15 anos.	16
Figura 7 – Clusters entre os autores com maior número de citações (em amarelo).17	
Figura 8 – Clusters entre os países de origem das pesquisas, apontando suas relações e influências, levando em consideração o ano das publicações.	17
Figura 9 – Mapa dos países com mais publicações, representadas pela escala de cores, em que o verde claro indica menos pesquisas e o verde mais escuro indica mais pesquisas.....	18
Figura 10 – Espécies fúngicas mais utilizadas nos estudos.	19
Figura 11 – Resíduos mais utilizados nos estudos.	20
Figura 12– Elementos e/ou aplicações mais desenvolvidas nos estudos.....	21
Figura 13– Modo de produção dos blocos de micélio mais citado nos artigos.	22
Figura 14 – Gráfico demonstrando a relação entre os valores encontrados na literatura entre densidade, condutividade térmica e resistência à compressão.	25
Figura 15 – Hy-Fi Tower.....	26
Figura 16 – MycoTree.....	27
Figura 17 - Fluxo da produção, demonstrando o processo de crescimento biológico e o processo robótico de fabricação de componentes à base de micélio.....	29
Figura 18 - Registro fotográfico das bioespumas obtidas através das espécies: (A) <i>Pycnoporus sanguineus</i> , (B) <i>Pleurotus albidus</i> e (C) <i>Lentinus velutinus</i>	31

Figura 19– Tijolo de argamassa à base de micélio (a); Formação de pó branco na amostra (b); Concreto geopolímero à base de micélio e tratado com NaOH (c).	33
Figura 20 – Fluxograma do método utilizado no método experimental.	35
Figura 21 – Mapa da produção de café por estado, representados por escala de cores, em que o verde mais claro indica a menor porcentagem e o verde mais escuro, a maior.....	37
Figura 22 – Três frascos de vidro Erlenmeyer com casca de café preenchidos com água deionizada.	38
Figura 23 – Processo de absorção de água das cascas de café pelo método “tea bag” (adaptado).....	40
Figura 24 – Preparação das cascas de café para análise no MEV.	41
Figura 25 – Cascas de café no moinho de facas.	42
Figura 26– Processo para determinação de extrativos, utilizando equipamento extrator do tipo Soxhert com ciclohexano (a), e posterior filtragem (b).	42
Figura 27 – Sementes da espécie <i>Pleurotus ostreatus</i> em saco de polipropileno.	44
Figura 28 – Processo de fervura das cascas de café.	45
Figura 29 – Separação das quantidades de casca de café e água destilada (a) para uma amostra e posteriormente, para três amostras (b).....	46
Figura 30 – Amostra com casca de café durante o processo de hidratação.....	46
Figura 31 – Autoclave e manômetro apontando para a temperatura utilizada na esterilização: 120°C.	47
Figura 32 – Sementes já incubadas com a espécie fúngica, sendo levadas para as formas (a), próximas ao bico de Bunsen (b), para não contaminarem com o meio externo.....	47
Figura 33 – Corpos de prova embalados dentro da estufa.....	48
Figura 34 – Amostra (CP1) após 14 dias de crescimento.	48
Figura 35 – Resultado da amostra (CP1) desmoldada, indicando a pele fúngica mais espessa na parte superior (a), na lateral (b) e em menor quantidade na parte inferior (c).....	49

Figura 36 – Análise da densidade dos corpos de prova com (a) parquímetro e balança (b).....	50
Figura 37 – Equipamento para análise de condutividade térmica.	51
Figura 38 – Sensor posicionado simultaneamente na amostra pelo lado externo da caixa (a) e pelo lado interno (b).	51
Figura 39 – Amostra de face irregular que foi extraída de um dos CP.	52
Figura 40 – Resultado da absorção de água da casca de café, utilizando o método “tea bag”.	54
Figura 41 – Microscopia de varredura eletrônica da casca de café na seção transversal, com zoom de 150x (a) e 500x (b).	55
Figura 42 – Microscopia de varredura eletrônica da casca de café antes (a) e após tratamento (b), ambas com zoom de 200x.....	55
Figura 43 – Relação entre a temperatura e os tempos marcados durante o ensaio.	58
Figura 44 – Análise morfológica da casca de café, com zoom de 40x.	59
Figura 45 – Análise morfológica da placa (lã isolante) de micélio com zoom de 80x (a) e 500x (b).....	60
Figura 46 – Perspectivas das edificações de escritórios modeladas com um pavimento térreo (a) e três pavimentos (b).	63
Figura 47 – Planta baixa do pavimento térreo (a) e do pavimento tipo (b).	64
Figura 48 – Mapa indicando as zonas bioclimáticas brasileiras com destaque para a ZB1 (em azul), ZB8 (em amarelo) e respectivas cidades.	66
Figura 49 – Consumo anual de eletricidade para edificação de 1 pavimento, considerando os gastos energéticos com ar-condicionado, iluminação e equipamentos nas cidades de Fortaleza e Curitiba.	68
Figura 50 – Consumo anual de eletricidade para edificação de três pavimentos, considerando os gastos energéticos com ar-condicionado, iluminação e equipamentos nas cidades de Fortaleza e Curitiba.	69
Figura 51 – Consumo energético anual de ar-condicionado para edificação de um e três pavimentos, nas cidades de Fortaleza e Curitiba.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos processos de produção encontrados nos artigos.	23
Tabela 2 – Valores de densidade, condutividade térmica e resistência a à compressão, segundo os autores encontrados na literatura e suas respectivas composições (espécie fúngica e resíduos).	24
Tabela 3 – Valores médios de massa específica aparente (Y_a), teor de umidade (U), absorção de água inicial (W_0) e final (W_{max}) da casca de café.	54
Tabela 4 – Resultado da média de valores da composição química parcial das cascas de café.	56
Tabela 5 - Valores dos índices de densidade aparente em kg/m^3	57
Tabela 6 – Dados de densidade aparente e condutividade térmica das amostras. ...	59
Tabela 7 – Detalhes da composição dos cenários dos sistemas avaliados.	63
Tabela 8 - Dados de entrada dos materiais para a simulação no DesignBuilder.	65
Tabela 9 – Descrição dos 16 tipos de combinação, considerando o número de pavimentos, cidade e variação dos cenários.	67

Capítulo 1

Introdução

1.1.Contextualização

A questão ambiental tem sido um dos maiores desafios da contemporaneidade. As mudanças climáticas, assim como o desmatamento e a desertificação são exemplos de alguns impactos ambientais, causados pelo homem, que ameaçam a biodiversidade do planeta (Kibert, 2020). As evidências dessas alterações estão sendo observadas atualmente, por meio de ondas de calor, chuvas intensas, secas e ciclones tropicais, que estão cada vez mais intensos e frequentes.

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC (2021) alerta que a temperatura da superfície terrestre continuará subindo caso não ocorram reduções significativas dos gases de efeito estufa (GEEs) nas próximas décadas.

Nesse contexto, Larivour (2017) relata que os processos construtivos são responsáveis por grande parte das emissões de gases, bem como, do consumo de recursos naturais e geração de resíduos. As emissões de GEEs provenientes da construção de edifícios podem ser divididas em: (I) carbono operacional, resultante da energia utilizada para operar a edificação, com calefação, resfriamento, iluminação etc.; e (II) carbono incorporado, que está relacionado com a produção e extração dos materiais, com o seu transporte, manutenção e fim de vida (Kibert, 2020).

A indústria da construção é responsável por 37% da energia operacional global e de emissões de CO₂, dos quais 9% correspondem à fabricação de materiais convencionais como concreto, alumínio, aço, vidro e tijolo (IEA e UNEP, 2022). Além disso, consomem muita energia e recursos naturais, que estão se tornando cada vez mais limitados, devido ao aumento populacional e escassez de reservas.

Portanto, a alteração do cenário de consumo energético das edificações está cada vez mais urgente. Algumas soluções têm sido propostas, entre elas, a redução do consumo de energia das edificações, a partir da utilização de outras fontes de energia e materiais alternativos (Kibert, 2020). Desse modo, as edificações com baixo carbono (incorporado e operacional), que promovem a circularidade dos materiais e a eficiência energética, têm sido cada vez mais almejadas (Araujo, 2023). Abdelhady, Spyridonos e Dahy (2023) observam que o maior entendimento acerca das mudanças climáticas e dos impactos ambientais têm aumentado a busca por materiais mais eficientes e alternativos aos convencionais.

Os materiais de origem biológica, também conhecidos como biomateriais, são um dos exemplos propostos nessas estratégias de mitigação. Em sua maioria, possuem baixa energia (elétrica) incorporados, são renováveis e estão disponíveis globalmente. Além disso, apresentam um desempenho térmico superior (em termos de transferência de calor) aos materiais construtivos convencionais utilizados nas edificações devido à sua elevada porosidade (Silva *et al.*, 2018).

Um desses biomateriais tem atraído interesse acadêmico e comercial na última década. O micélio vegetativo de fungos superiores¹ é uma opção produtiva de baixa energia elétrica e de reutilização de resíduos agrícolas, biológico, constituído pelo crescimento de fungos filamentosos (hifas). Segundo Jones *et al.* (2020), o material possui muitas vantagens, destacando-se pelo seu baixo custo, a partir da utilização de recursos naturais mais baratos (por serem resíduos agrícolas), e pelo seu potencial de baixo impacto ambiental ao consumir menos energia em sua produção. Além disso, são biodegradáveis, podendo ao final de sua vida útil, retornarem para composteiras, contribuindo com a economia circular, se mostrando como uma nova possibilidade para a construção sustentável.

A partir do que foi exposto, a presente pesquisa se justifica principalmente por estudar um biomaterial de construção não convencional (desde a microescala até a simulação do seu comportamento na arquitetura), que possui ainda pouca informação científica acerca do seu desenvolvimento e das suas aplicações construtivas. Estima-se que este material possui um grande potencial no campo da economia circular e das construções de baixo carbono devido à utilização de resíduos agroindustriais como fonte de produção. Para além disso, existe uma lacuna de conhecimento ainda maior sobre a temática, especialmente quando consideramos o contexto brasileiro, e de outros países do Sul Global.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O presente estudo tem como objetivo produzir e realizar testes com uma lã isolante de micélio e posteriormente, analisar o desempenho termoenergético do material quando aplicado em um projeto arquitetônico.

¹O termo correto é micélio vegetativo de fungos superiores, no entanto, será adotado neste trabalho apenas o termo **micélio** para facilitar a compreensão.

1.2.2. Objetivos Específicos

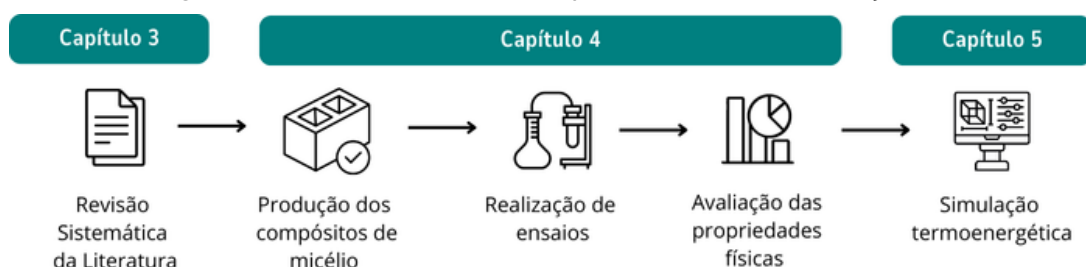
- Desenvolver um método experimental para produção de uma lã isolante de micélio fúngico a partir da casca de café, e realizar ensaios para avaliar suas propriedades físicas e térmicas.
- Realizar simulações computacionais para avaliar o desempenho termoenergético do material, considerando diferentes cenários de aplicação para uma edificação de escritórios, de um e três pavimentos, considerando os cenários climáticos de Curitiba e de Fortaleza.

1.3. Estrutura da dissertação

A estrutura do presente trabalho foi dividida em seis capítulos. A figura 1 demonstra um fluxograma dos principais métodos utilizados.

- **Capítulo 1:** São introduzidos o contexto, a motivação e os objetivos do trabalho;
- **Capítulo 2:** Expõe um breve referencial teórico acerca da sustentabilidade e a crise climática, das edificações sustentáveis, dos biomateriais e o surgimento do micélio como opção construtiva neste cenário;
- **Capítulo 3:** Consta uma revisão sistemática da literatura sobre o micélio na arquitetura e na construção civil, a fim de compreender o panorama geral de suas aplicações e modos de produção;
- **Capítulo 4:** Relata o método experimental realizado para produzir uma lã isolante de micélio e os resultados obtidos nos ensaios;
- **Capítulo 5:** Apresenta o fluxo de trabalho realizado para desenvolver as simulações computacionais termoenergéticas e os resultados obtidos;
- **Capítulo 6:** São apresentadas as considerações finais da pesquisa e propostas para futuros trabalhos;
- **Apêndice:** Consta os produtos originados da revisão sistemática da literatura em uma tabela síntese mais detalhada.

Figura 1 - Métodos utilizados no capítulo 3, 4 e 5 da dissertação.



Fonte: A autora.

Capítulo 2

Referencial teórico

2.1. A sustentabilidade e a crise climática

Para muitos, a Primeira Década do Desenvolvimento das Nações Unidas, em 1960, marca o início do movimento pelo desenvolvimento sustentável. No entanto, Boff (2017) defende que o conceito de sustentabilidade teria surgido séculos antes, na Saxônia, a partir da preocupação pelo uso racional das florestas, de forma que elas pudessem se regenerar e se manterem permanentemente. Para ele, embora a palavra tenha sido originada por volta de 1560, acabou tendo sua origem comumente ligada aos marcos das conferências da ONU, por estes terem trazido um alarme ecológico à população.

Nesse sentido, vale destacar alguns marcos históricos importantes na consolidação do desenvolvimento sustentável, sendo estes: (I) a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (CNUMAH), realizada em 1972 em Estocolmo, que culminou na decisão de criar o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma); (II) a publicação do relatório *Nosso Futuro Comum* pela Comissão Mundial do Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD ou Comissão Brundtland), em 1987, em que surgiu a definição mais conhecida atualmente, como “aquela que atende as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem a suas necessidades e aspirações”; (III) a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, no Rio de Janeiro, em 1992, que resultou na publicação da Agenda 21, dentre outros documentos (Barbieri, 2020).

Foi a partir do sucesso dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODMs), em 2000, que as Nações Unidas lançaram, como parte da Agenda 2030, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em 2015 (Barbieri, 2020). Na Agenda 2030 estão estabelecidos os planos de ação para a construção de uma sociedade que incorpore os direitos humanos, a igualdade de gênero, a justiça social, e mantenha os recursos naturais para as próximas gerações, incluindo os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Nações Unidas, 2015).

Entretanto, segundo o IEA e UNEP (2022), ainda falta um caminho longo a se percorrer para alcançarmos o êxito contra impactos das mudanças climáticas. Pelo relatório do *Global Buildings Climate Tracker* (IEA e UNEP, 2022) o setor dos edifícios continua distante em alcançar a descarbonização até 2050. As emissões observadas e o consumo de energia continuaram a aumentar, mesmo para além dos níveis pré-pandemia, concluindo que a descarbonização do setor não tem ido totalmente de encontro aos objetivos do Acordo de Paris. Para os cientistas, não há um vislumbre

de esforços que possam reverter a situação de forma imediata e, mesmo que todos os países concretizem os compromissos climáticos assumidos, não seria suficiente para uma diminuição significativa do aquecimento global. Porém, o relatório também aponta algumas movimentações e compromissos estabelecidos para a redução da emissão de carbono, com maior financiamento de tecnologias sobre o tema.

Nesse sentido, todos os setores de desenvolvimento devem se atentar para essas demandas e desafios, especialmente o setor da construção civil (ligado principalmente à produção de materiais e obras) e operação das edificações (ligada principalmente ao consumo de energia e seus impactos ambientais).

2.2. Edificações sustentáveis

Desde a criação da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente em 1992, têm se reforçado o conceito de sustentabilidade no intuito de minimizar os danos causados pela ação do homem à natureza, incluindo-se sobre esta lógica, a prática da arquitetura. Segundo Carvalho e Silvoso (2020), desde as primeiras construções, a produção arquitetônica seguia os princípios sustentáveis, isto é, utilizava materiais locais de baixo custo econômico e energético. Contudo, ao longo dos séculos, principalmente após a Revolução Industrial, outros interesses foram sendo priorizados, e as construções ficaram cada vez mais afastadas dos conceitos sustentáveis. Nos últimos 60 anos, no entanto, as discussões acerca deste movimento voltaram a reconsiderar a relação entre a edificação e seu entorno, dando espaço para “novas” definições como “Arquitetura Bioclimática” e “Arquitetura Verde”.

A construção verde pode ser entendida como um esforço para expandir os efeitos positivos no ambiente construído, e mitigar os efeitos negativos no ambiente natural, logo, objetivam preservar os recursos naturais e melhorar a qualidade de vida dos usuários dessas edificações (BID, 2020).

Para contextualizar o movimento das edificações sustentáveis, é preciso entender que ele se desenvolveu paralelamente ao movimento ambiental. Fatos como a criação do primeiro Dia da Terra pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, bem como a publicação do livro *Primavera Silenciosa*, de Rachel Carson, foram fundamentais para a mudança de pensamento ambiental da sociedade naquela época. Com a crise do petróleo em 1970, houve um interesse ainda maior em relação a eficiência energética, tecnologias solares, isolamento térmico e sistemas de recuperação de energia. Inclusive, o governo federal norte-americano forneceu créditos tributários para serem revertidos em desenvolvimento energético e tecnologias inovadoras. Após isso, diversas normas de eficiência foram incorporadas

aos códigos estaduais. Apesar de muitos edifícios eficientes em energia terem surgido nessa época, os primeiros exemplos de edificações sustentáveis só aconteceram por conta da pressão feita por grandes organizações ambientais norte-americanas, que exigiram estratégias holísticas de projeto para os edifícios de seus escritórios. Em resposta a isso, anos depois, em 1998, o USGBC (*United States Green Building Council*) desenvolveu um sistema de certificação de edificações, chamado LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), que rapidamente dominou o mercado de certificações (Kibert, 2020), conhecido até hoje.

No Reino Unido, as primeiras abordagens acerca das construções sustentáveis ocorreram pela primeira vez em 1989, a partir da criação de um sistema de certificação de edificações, chamado BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*). O sistema obteve sucesso, pois propôs uma definição padronizada para edificações ecológicas (ou sustentáveis), e representou o primeiro esforço bem-sucedido na avaliação de desempenho de energia, consumo de água, qualidade do ambiente interno, localização, materiais utilizados e impactos ambientais das edificações. Depois disso, sistemas similares foram desenvolvidos: na França, o HQE (*Haute Qualité Environnementale*), de 2004, e sua versão brasileira AQUA-HQE, em 2008; no Japão, em 2004, com o CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*); na Austrália, em 2006, com o *Green Star*; e na Alemanha, em 2009, com o DGNB (*Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen*). A partir deles, outros sistemas de certificação surgiram, havendo uma maior concretização do conceito de alto desempenho, e do sistema de pontuação que indica se o projeto está alcançando seus objetivos de sustentabilidade (Kibert, 2020).

No Brasil, em 2009, a Caixa Econômica Federal, lançou o selo Casa Azul CAIXA, que objetivava estimular a adoção de soluções urbanísticas e arquitetônicas de qualidade, com uso racional de recursos naturais, conscientizando empreendedores e moradores sobre os benefícios sociais e econômicos das construções sustentáveis. É um sistema de certificação voltado exclusivamente para o programa habitacional, sendo dividido em duas categorias: Projetar (destinado ao financiamento de projetos de construção de habitações para famílias de baixa renda) e Habitar (destinado ao financiamento da aquisição de imóveis já construídos para famílias de baixa renda) (CAIXA, 2024).

Em síntese, as certificações contribuem com a redução dos impactos ambientais, com a melhoria de processos da construção civil e no atendimento dos ODS, porém, é preciso assumir que ainda existem desconpassos nos critérios analisados pelos sistemas. Farr (2013) alerta que para ganhar aceitação do mercado, a maioria dos programas de certificação combinam exigências mínimas de desempenho com uma listagem de

boas práticas para a edificação ser considerada “sustentável”. Isso significa que um prédio pode ser certificado mesmo que não consiga um bom desempenho em alguma categoria. O que se percebe é que alguns selos valorizam desproporcionalmente as medidas de eficiência energética em comparação com outras medidas, como as escolhas de materiais de baixo impacto, por exemplo (Costa, Carvalho e Alves, 2022).

Diante desse cenário, existem outras ferramentas, além das certificações, com potencial na mitigação das mudanças climáticas. Vale destacar a avaliação do ciclo de vida (ACV), a modelagem de informação da construção (BIM), o passaporte de materiais, a realidade virtual e a aumentada, entre outras (Caldas *et al.*, 2022). Em relação aos projetos de arquitetura, Salgado (2020) aponta que as novas tecnologias permitem a realização de simulações que possibilitam a identificação de incompatibilidades nos projetos, evitando o desperdício de material nas obras. Não só isso, as simulações, especialmente as que avaliam o desempenho termoenergético, quando aplicadas ainda nas fases iniciais de projeto, permitem a comparação de diferentes soluções arquitetônicas, promovendo a eficiência energética e a mitigação dos impactos no ciclo de vida de toda a edificação (Araujo, 2023).

Percebe-se que o papel das edificações diante do cenário ambiental é fundamental e pode ser desempenhado a partir do desenvolvimento de edificações com baixo carbono, eficientes energeticamente, e que promovem a circularidade dos materiais. Nesse contexto, os biomateriais surgem como uma opção favorável e por isso merecem maior atenção.

2.3. Os biomateriais de construção

Como visto, a questão ambiental tem sido um dos grandes desafios da contemporaneidade. Yadav e Saini (2021) pontuam que os materiais de construção consomem atualmente cerca de 40% de energia nas fases do ciclo de vida, como: fabricação, construção, uso e demolição. Esta energia incorporada, juntamente com a energia operacional, representa a energia do ciclo de vida dos edifícios. Inclusive, segundo Malmqvist *et al.* (2018), estudos apontam para uma diminuição do impacto da energia operacional e de emissões de GEEs como resultado da substituição de combustíveis fósseis por energias renováveis.

Da mesma forma, percebe-se que o potencial de desempenho dos biomateriais representa uma área crescente no setor da construção contemporânea. Yadav e Saini (2021) afirmam que os diferentes biomateriais oferecem amplas possibilidades de utilização em vários níveis da construção visando otimizar o uso e o desempenho de produtos e elementos. Silva *et al.* (2018) confirmam que os biomateriais possuem

baixa energia (elétrica) e carbono incorporado, são renováveis e podem ser facilmente integrados em sistemas construtivos pré-fabricados. Do ponto de vista do conforto térmico, também trazem benefícios porque possuem baixa transmitância térmica, sendo mais adequados para a envoltória (fachada e cobertura) e isolamento das edificações.

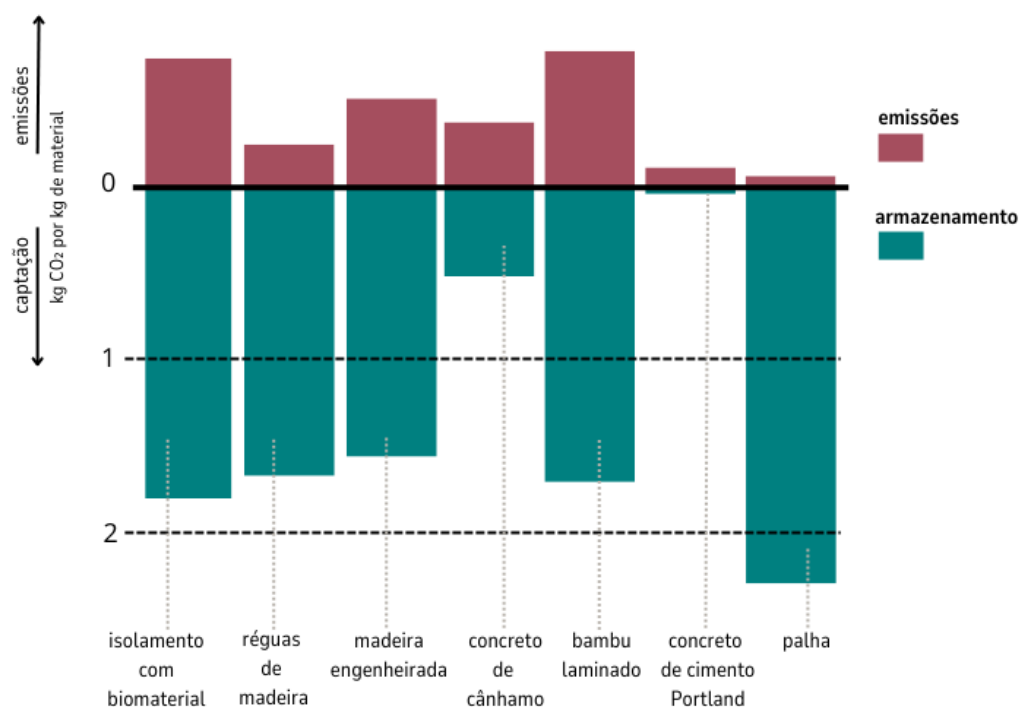
Alguns destes materiais têm desempenhado papel fundamental na mitigação e adaptação das mudanças climáticas, dentre eles está a madeira, a mais popular e “comum”, porque existe a séculos e suas aplicações são bem conhecidas, desde as mais tradicionais até as mais modernas, como a madeira laminada cruzada (Mouton, Allacker e Röck, 2023).

Já o bambu, por conta do seu rápido crescimento e produção, consegue capturar mais carbono do que a madeira convencional, quando utilizado em produtos duráveis. Além do que, as florestas de bambu podem auxiliar as comunidades rurais a se tornarem menos vulneráveis frente às mudanças climáticas, devido a sua exploração ocorrer dentro de uma década (ou menos) de sua plantação (INBAR, 2014).

Em outro contexto, a construção com a palha e o cânhamo têm crescido especialmente na Europa, podendo ser aplicados como isolantes, blocos pré-fabricados ou elementos construtivos. Kallakas *et al.* (2018) reiteram que o uso de fibras naturais, como cânhamo, também tem surgido como opção viável, porque além de serem baratos, possuem boas propriedades físicas e mecânicas.

Na Figura 1 é apresentado o potencial de armazenamento de carbono de diferentes biomateriais. Para avaliar os benefícios e os impactos dos edifícios que utilizam materiais de base biológica em seu processo construtivo, a avaliação do ciclo de vida (ACV) se apresenta como uma metodologia de identificação dos impactos ambientais ao longo da produção, utilização, e fim de vida desses materiais. Em relação aos biomateriais, especialmente os menos comuns, Cascione *et al.* (2022) pontuam, que ainda existe uma lacuna sobre a quantificação do potencial de aquecimento global (entre outros impactos), devido à complexidade de avaliar todos os cenários de materiais que ainda não possuem sistemas construtivos totalmente estabelecidos, como é o caso do micélio. Como observado na Figura 2, ainda existe uma lacuna do material em relação ao micélio a partir da ACV. Nesse caso, nem sempre os estudos conseguem comparar desempenhos de diferentes sistemas porque eles utilizam diferentes unidades funcionais, o que leva a diferentes espessuras e quantidades analisadas.

Figura 2- O potencial de armazenamento de carbono em comparação com as emissões de berço ao portão, associadas à fabricação por kg de material



Fonte: Pomponi *et al.* (2020) traduzido pela autora.

Em geral, os biomateriais quando empregados nas edificações têm o potencial de trazer os seguintes benefícios: (1) melhorar o desempenho termoenergético; (2) diminuir a pegada de carbono; (3) contribuir para um projeto mais sustentável (devido principalmente ao fato de serem renováveis e uma maior facilidade de serem degradados no seu fim de vida). Por outro lado, os principais desafios: (1) resistência à degradação biológica e (2) ao fogo. Podem ser utilizados em fachadas, elementos construtivos, paredes, vedações, pisos, coberturas, mobiliário, entre outros (Araujo, 2013).

Assim, será explorado adiante um biomaterial que tem surgido principalmente como opção de produção de baixa energia e de reutilização de resíduos. É um material inovador e moderno, gerado a partir de um processo biotecnológico, que utiliza espécies de fungos cultivados com resíduos agroindustriais (Aiduang *et al.*, 2024).

2.4. O Micélio

2.4.1. A importância dos fungos e sua estrutura

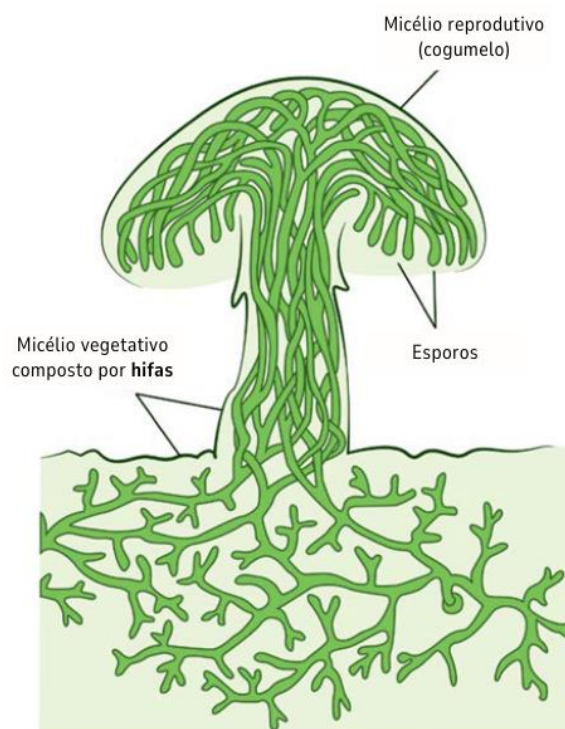
Novas espécies são descobertas no Reino Fungi a cada ano (Drechsler-Santos, 2015). Dentre esses seres, os fungos filamentosos são mais conhecidos por seus bolores

(fungos filamentosos microscópicos) e cogumelos (fungos filamentosos macroscópicos). O mundo desses organismos é muito amplo e a grande maioria é benéfica para outras espécies, inclusive a humana (Esposito e Azevedo, 2010).

Os fungos vão absorver os nutrientes necessários para o seu crescimento de qualquer matéria orgânica disponível (Galvagno e Forchiassin, 2010), independente do modo de nutrição, por absorção de matéria orgânica morta ou através de parasitismo de hospedeiros vivos (Silva e Malta, 2016). Por isso, são altamente eficientes na decomposição de uma ampla gama de substratos, podendo apresentar-se sob forma de leveduras, pseudomicélio ou constituído de hifas.

As hifas são “tubos” com parede celular e citoplasma (Drechsler-Santos, 2015), conforme ilustrado na Figura 3. O conjunto dessas hifas, ramificadas ou não, chama-se micélio (Leite e Esposito, 2010).

Figura 3 - Micélio constituído por hifas, desenvolvendo um cogumelo (estrutura reprodutiva).



Fonte: Drechsler-Santos (2015) adaptado pela autora.

Estruturalmente, o micélio vegetativo consiste em uma rede densa e tridimensional de filamentos finos, tubulares e ramificados, chamados hifas (ilustradas abaixo da Figura 3). Esses filamentos crescem por extensão apical e ramificações repetidas, permitindo ao micélio explorar e colonizar o meio orgânico em que o fungo se desenvolve (Barta et al., 2024). Em contrapartida, o micélio reprodutivo, localizado

acima da Figura 3, se distingue pela presença de um corpo frutífero (o cogumelo), que é responsável pela reprodução dos fungos (Leite e Esposito, 2010).

Em condições ideais, o crescimento fúngico segue ocorrendo. No entanto, se houver uma redução crítica dos nutrientes disponíveis no meio, ou mudanças de temperatura e pH, podem ocorrer uma sequência de etapas que leva à esporulação. Em comparação, os esporos têm um papel semelhante as sementes dos vegetais, assim como a esporulação “equivale” a reprodução. Pode-se então considerar que os esporos (presentes na “capa” dos cogumelos, identificados na Figura 3) são os responsáveis pela geração de novos indivíduos, dispersando-os em um novo local, garantindo a sobrevivência da espécie até o retorno das condições favoráveis que favorecem o crescimento fúngico (Leite e Esposito, 2010).

Nesse sentido, é importante mencionar que os fungos filamentosos também têm sido estudados e aplicados na indústria de alimentos, na medicina, e especialmente no contexto ambiental, dada a sua capacidade de decompor a matéria orgânica e reciclar diversos compostos, inclusive aqueles que podem gerar danos ao meio ambiente, como o carbono e o nitrogênio (Silva e Esposito, 2010). Dessa forma, ainda há muito potencial a ser explorado, e a partir disso, a biotecnologia tem se destacado com a introdução dos fungos filamentosos em seus avanços tecnológicos em prol da saúde humana e do equilíbrio ambiental (Silva e Malta, 2016).

Após o breve entendimento acerca dos fungos filamentosos e sua estrutura biológica, é necessário entender outras questões, principalmente no que diz respeito às vantagens de utilização desses organismos no setor da construção, ponto chave da presente pesquisa.

2.4.2. Uma nova alternativa construtiva

Um dos principais desafios que enfrentamos atualmente é a descoberta de materiais ecológicos que as indústrias podem desenvolver para reduzir o impacto ambiental associado aos materiais convencionais, principalmente no setor da construção (Aiduang *et al.*, 2024). Diante disso, o estudo a partir do crescimento do micélio, tem atraído interesse acadêmico e comercial, principalmente nesta última década. Özdemir *et al.* (2022) argumentam que o cogumelo em si, não tem sido o alvo desses estudos, mas sim o micélio vegetativo, um aglutinante natural.

Além de possuírem uma série de vantagens em relação aos materiais construtivos convencionais, destacam-se também pelo seu baixo custo, baixo impacto ambiental e de pegada de carbono, ao consumir menos energia elétrica em sua produção (Jones *et al.*, 2020).

Sob condições industriais apropriadas podem ser biodegradáveis e recicláveis, contribuindo com a circularidade dos materiais (Barta *et al.*, 2024). De acordo com o *Carbon Neutral Cities Alliance* (CNCA, 2024), no Manual da Cidade para Edifícios Neutros em Carbono é reportado que a maioria dos fabricantes procura por resíduos para fabricar seus produtos. É por isso que os painéis de micélio vão de encontro com os princípios da economia circular, pois assim, os subprodutos que iriam para aterros sanitários agora estão sendo aproveitados como insumos valiosos no processo de fabricação.

O modo de produção desses blocos inicia quando o fungo encontra um local propício para crescer. Então, a rede de hifas (micélio vegetativo) aglutina o resíduo, deixando-o mais rígido, formando um elemento sólido (demonstrado na Figura 4).

Figura 4 – Bloco final pós crescimento fúngico e desidratação.



Fonte: Barta *et al.* (2024).

Os resíduos agrícolas mais comuns utilizados nessas misturas são a serragem de madeira, a palha, o cânhamo, grãos de trigo etc. (Lingam *et al.*, 2023). Cada subproduto desses é composto por diferentes concentrações de polissacarídeos, lipídios e proteínas. Essas diferenças refletem diretamente nas propriedades mecânicas do micélio (Haneef *et al.*, 2017).

Em geral, segundo Elsacker *et al.* (2021), os materiais à base de micélio apresentam um comportamento dúctil e a falta de homogeneidade na distribuição do micélio e do resíduo acabam afetando a capacidade do material de suportar cargas, ou seja, o biomaterial oferece boas propriedades térmicas e mecânicas, atuando como um bom isolante térmico, mas não é adequado para fins estruturais.

Diante do que foi exposto, a fim de identificar o histórico de desenvolvimento do micélio, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, por meio do mapeamento de artigos publicados entre 2018 e 2024. O objetivo desta revisão buscou responder os seguintes questionamentos: (i) Quais resíduos e espécies fúngicas estão sendo mais utilizadas atualmente? (ii) Como é feita a produção deste material? (iii) Quais

elementos construtivos ou aplicações construtivas estão sendo feitas com o micélio?
(iv) Quais propriedades estão sendo analisadas nesses experimentos?

A partir desta revisão, espera-se contribuir com o desenvolvimento e produção de materiais não-convencionais, biodegradáveis e com potencial de aproveitamento de resíduos, no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO), como é o caso do micélio.

Capítulo 3

Revisão Sistemática da Literatura

Nesta seção apresenta-se a revisão da literatura, demonstrando o atual estado da arte relativa ao tema deste trabalho. Os tópicos foram divididos da seguinte forma: (i) Pesquisas envolvendo o micélio e a construção civil; (ii) Principais materiais constituintes e propriedades encontradas nos estudos; (iii) Modo de produção dos experimentos; (iv) Elementos construtivos e aplicações na Arquitetura; (v) Avaliação do ciclo de vida.

Em primeiro lugar, a fim de identificar o histórico do desenvolvimento e uso de compósitos fúngicos na área de materiais e construção civil, foi feita uma revisão sistemática da literatura (RSL) de artigos científicos na língua inglesa entre os anos de 2018 e 2024, na base de dados Scopus, onde estão indexadas algumas das revistas mais relevantes mundialmente.

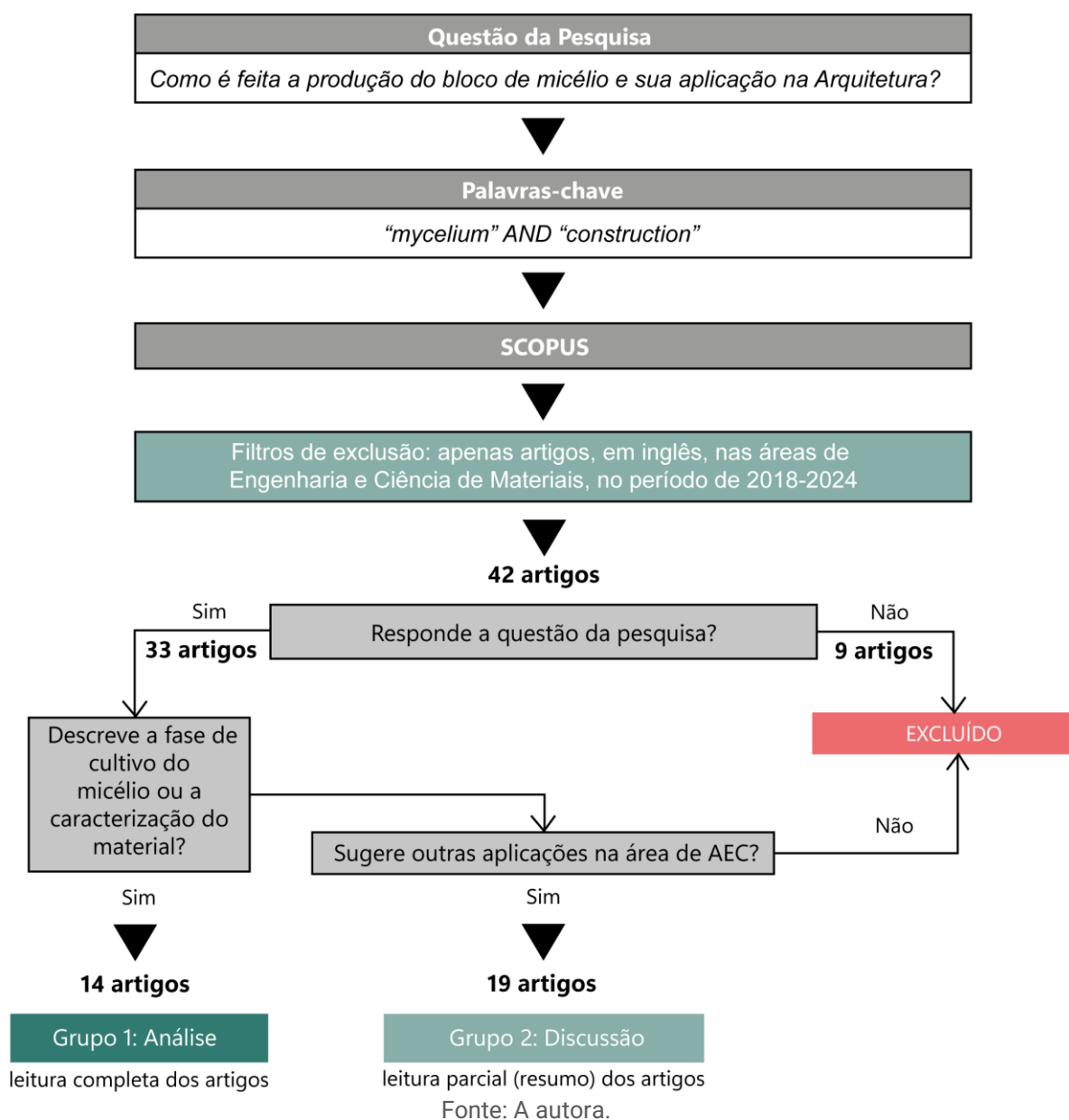
O método adotado pela RSL começou pela definição de uma questão, que deveria ser respondida pela literatura. Em seguida, foram elencados as palavras-chave e os critérios de exclusão da busca para filtrar os artigos que não respondiam a questão da pesquisa. Alguns artigos, quando considerados úteis ou correlatos, seguiram para uma análise qualitativa.

A questão da pesquisa definida foi “Como é feita a produção dos blocos de micélio e qual sua aplicação na Arquitetura?”. A seguir, utilizou-se as seguintes palavras-chave: *“mycelium” AND “construction”*.

Foram considerados apenas os artigos publicados em revistas científicas, excluindo dissertações, teses e capítulos de livros. Para a seleção dos artigos relevantes foram adotados os seguintes critérios de aceitação: (i) artigos em inglês; (ii) nas áreas de conhecimento de Engenharia e Ciência de Materiais; (iii) durante o período de 2018 a 2024; (iv) que apresentassem no título ou resumo, ou artigo completo, a questão da pesquisa.

A busca inicial, de acordo com os critérios da Figura 5, resultou em 42 artigos. Após a leitura na íntegra dos artigos, nove foram descartados por não atenderem aos seguintes critérios: (i) não estavam relacionados à área de arquitetura e construção civil; (ii) não descreveram a fase de crescimento e desenvolvimento do micélio ou a caracterização do material; (iii) não contribuiu para o desenvolvimento do experimento.

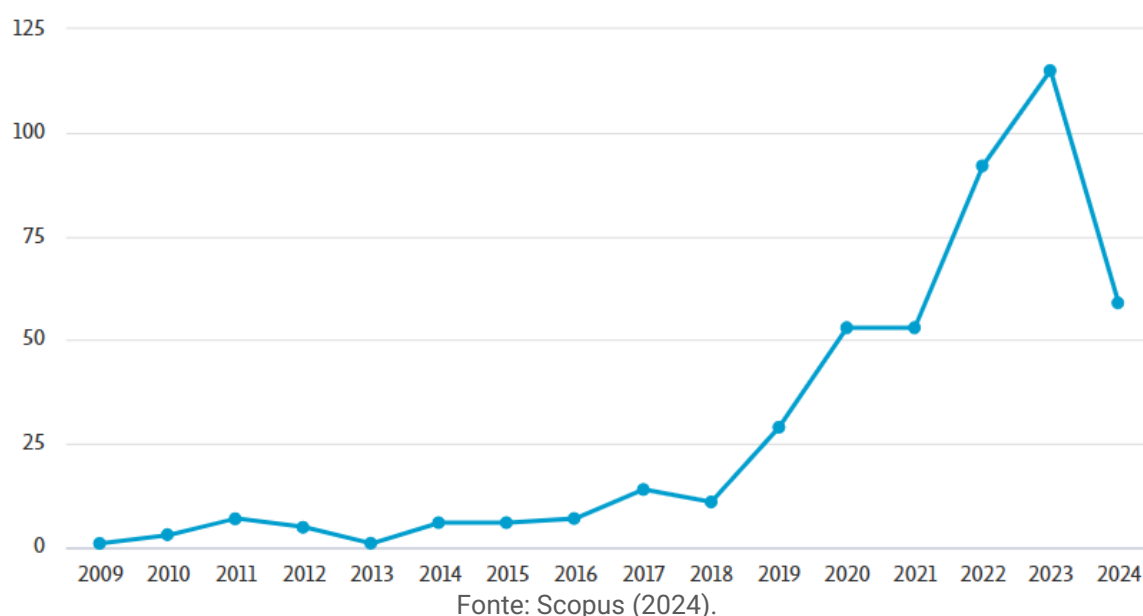
Figura 5 – Critérios adotados para a revisão da literatura.



Destes 33 artigos selecionados, 14 estavam totalmente relacionados aos critérios estabelecidos acima, demonstrando a produção de blocos de micélio com diferentes resíduos e espécies fúngicas, como também a aplicação de ensaios mecânicos para determinar sua resistência. Os outros 19 artigos apresentaram assuntos correlatos, ou seja, incluíram em suas pesquisas a produção de compósitos de micélio para diferentes aplicações, como bioespumas, compósitos para impressão 3D ou bioconcretos, que serão analisados posteriormente.

A partir dos 33 artigos mencionados referentes ao uso do micélio na construção civil, foram desenvolvidas as tabelas e figuras apresentadas a seguir.

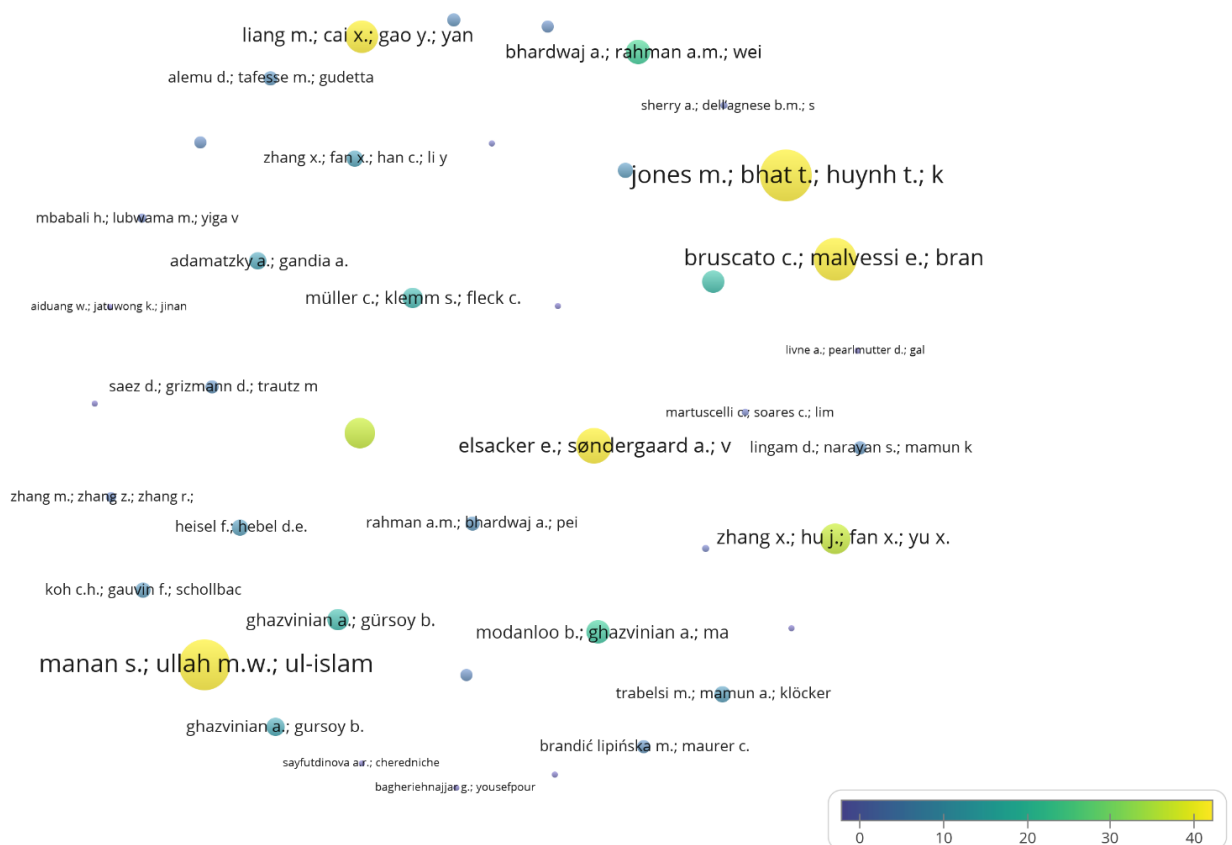
Figura 6 – Publicações sobre micélio na construção nos últimos 15 anos.



A Figura 6 demonstra os anos de publicação dos artigos. Embora o filtro de exclusão tenha sido aplicado para artigos mais recentes (a partir de 2018), foi elaborado um gráfico considerando as pesquisas sobre o tema dos últimos 15 anos. Pode-se observar que apareceram pequenos “picos” em 2011 e 2017, e desde 2019 as pesquisas envolvendo o assunto tem aumentado gradativamente. Estima-se que as pesquisas podem ter tido um crescimento a partir de 2014, devido a construção, no mesmo ano, do pavilhão *Hy-Fi Tower* em Nova York. Esta obra trouxe muita visibilidade para o micélio como potencial construtivo. Outro ponto a ser considerado é o declínio em 2024, que pode ser justificado pelo fato do período em que a busca foi realizada ter sido no primeiro trimestre, ou seja, é provável que seja superada a quantidade de publicações do ano anterior.

Já em relação ao conhecimento dos autores e suas colaborações, foi elaborado um mapeamento dos principais pesquisadores da área, com o auxílio da ferramenta VOSviewer, conforme ilustrado na Figura 6. Observa-se que os autores com trabalhos mais citados (em amarelo) foram: Jones *et al.* (2018) com 106 citações; Manan *et al.* (2021) com 105 citações; Bruscato *et al.* (2019) com 71 citações; Elsacker *et al.* (2021) com 50 citações; e Liang *et al.* (2022) com 40 citações. Nesse sentido, é natural que as publicações mais antigas, sejam mais mencionadas, o que não indica necessariamente o grau de importância desses estudos, mas sim, a relevância dos autores mais citados.

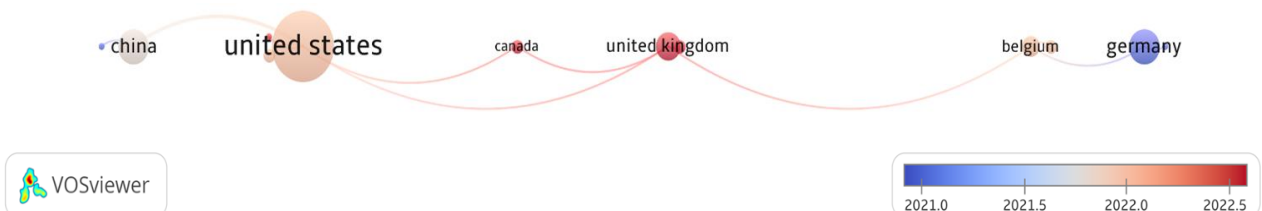
Figura 7 – Clusters entre os autores com maior número de citações (em amarelo).



Fonte: VOSviewer elaborado pela autora.

As Figuras 8 e 9 demonstram os principais países com publicações no tema. Paralelamente, foi desenvolvido outro mapeamento por meio do VOSviewer, indicando as conexões existentes entre os países de origem por ano. O tamanho dos círculos representa a quantidade de trabalhos publicados.

Figura 8 – Clusters entre os países de origem das pesquisas, apontando suas relações e influências, levando em consideração o ano das publicações.

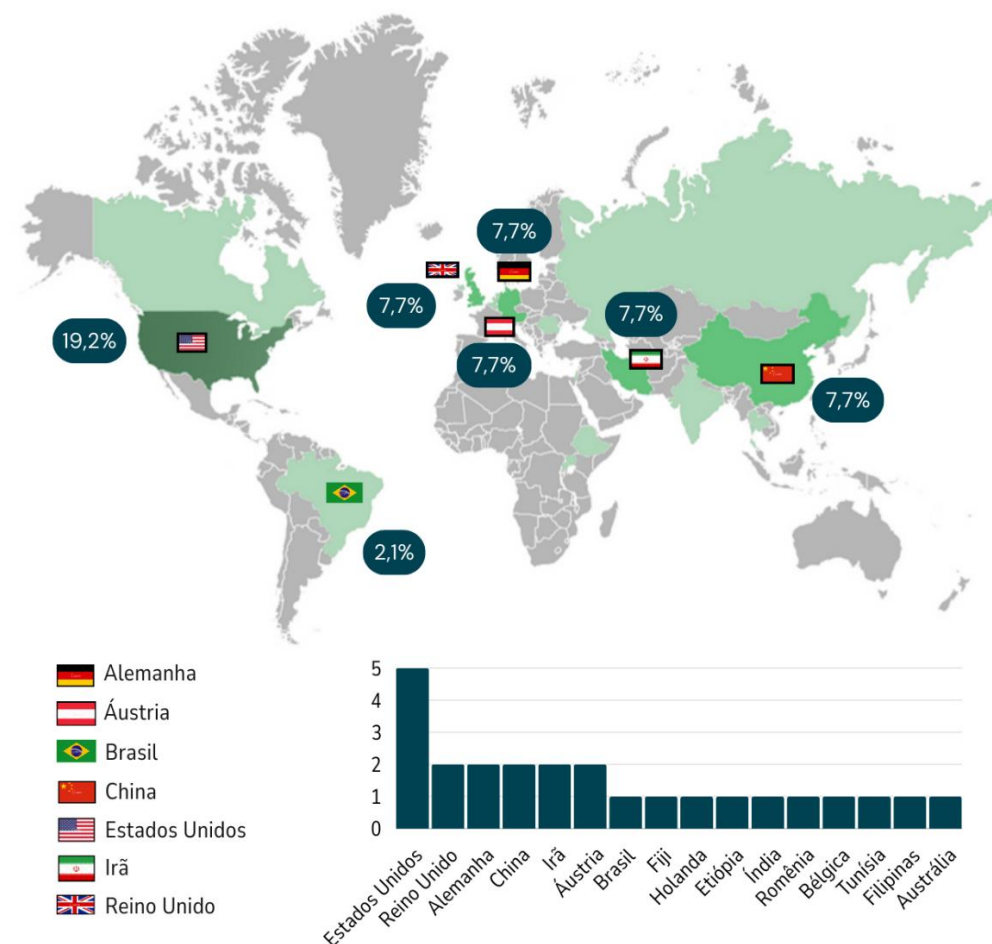


Fonte: VOSviewer elaborado pela autora.

Como indicado, as primeiras publicações são originadas na Alemanha, que influenciaram os trabalhos realizados na Bélgica. Em 2021, os trabalhos desenvolvidos na China influenciaram as publicações americanas, que por sua vez, influenciaram os estudos canadenses e britânicos em 2022.

Já neste mapa (Figura 9) é possível observar os países e continentes onde as pesquisas sobre o micélio estão sendo mais desenvolvidas, representadas pela escala de cores, em que o verde claro indica os locais com menos pesquisas e o verde mais escuro indica os locais com mais pesquisas. A partir dessa análise, percebe-se que os Estados Unidos têm liderado as pesquisas acerca do micélio, apresentando as maiores taxas de publicações, com quase 20%, seguido do Reino Unido, Irã, China e Áustria (com aproximadamente 8% cada um). O Brasil aparece na classificação (com 2,1%), por meio de uma única publicação sobre bioespumas, o que indica que as pesquisas brasileiras sobre o tema ainda não estão tão avançadas. Por outro lado, a justificativa para as pesquisas serem maiores em solos norte-americanos pode ocorrer pelo fato de duas das maiores fábricas mundiais (*Mycoworks* e *Ecovative*), produtoras de materiais derivados do micélio (como couro e embalagens), estarem localizadas no país.

Figura 9 – Mapa dos países com mais publicações, representadas pela escala de cores, em que o verde claro indica menos pesquisas e o verde mais escuro indica mais pesquisas.



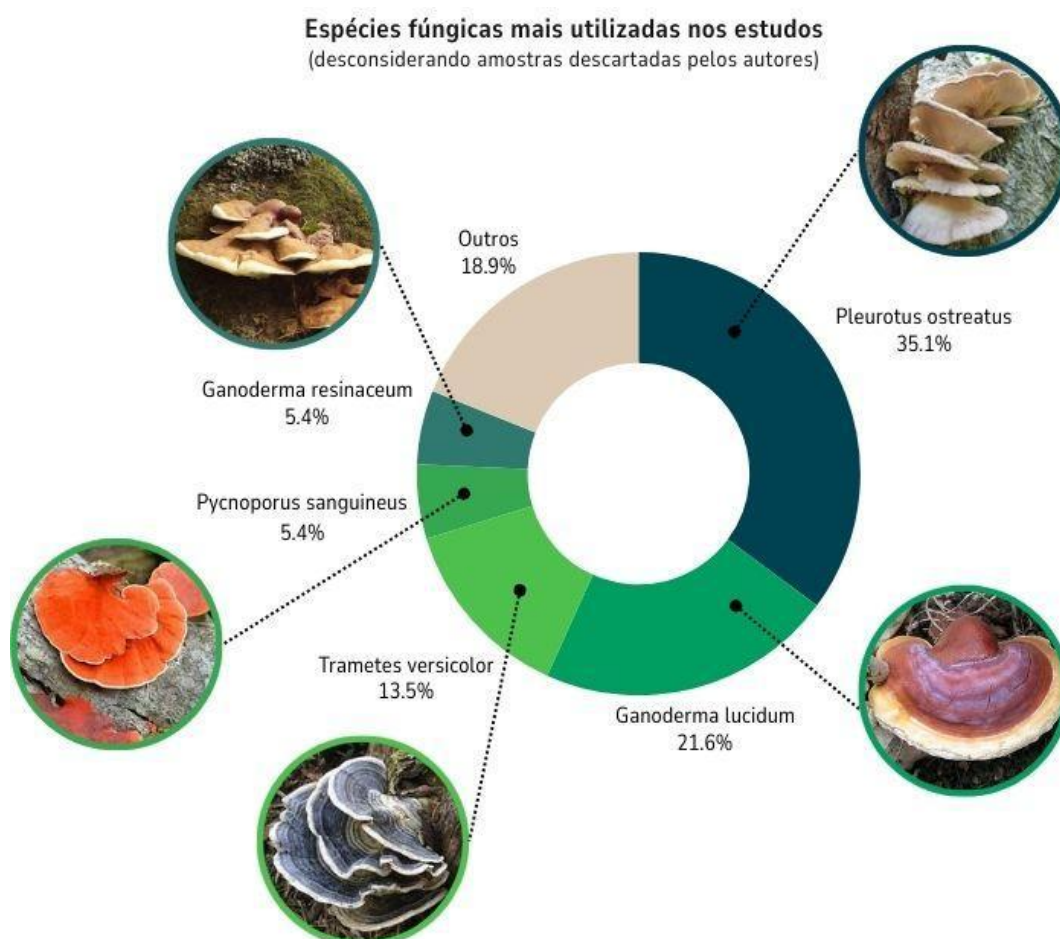
Fonte: A autora.

Para uma análise mais detalhada, foram compiladas as informações a seguir, em uma tabela síntese (Apêndice), que indica as espécies fúngicas utilizadas, resíduos, aplicações e propriedades, de acordo com cada artigo, autor e ano correspondente.

3.1. Principais materiais constituintes dos experimentos

Rezende *et al.* (2021) destacam as espécies do gênero *Pleurotus* como de produção relativamente fácil em resíduos como palha de cereais, grama seca, folhagens, serragem de madeira, resíduos da produção de milho, cascas de sementes, resíduos de café, bagaço da cana de açúcar, papel, papelão e subprodutos da indústria papelreira. As espécies *Pleurotus ostreatus* (shimeji), *Pleurotus ostreatus shimofuri* (shimofuri), *Pleurotus citrinopileatus* (citrus ou shimeji amarelo) e *Pleurotus djamor* (shimeji salmão) foram amplamente utilizadas em pesquisas, usualmente gerando blocos com boas características. Nesse sentido, a partir da leitura dos artigos selecionados, pode-se perceber que: (a) As espécies fúngicas mais utilizadas nos estudos (Figura 10) foram: *Pleurotus ostreatus* (35,1%), *Ganoderma lucidum* (21,6%) e *Trametes versicolor* (13,5%), seguidas de *P. sanguineus* (5,4%) e *G.resinaceum* (5,4%).

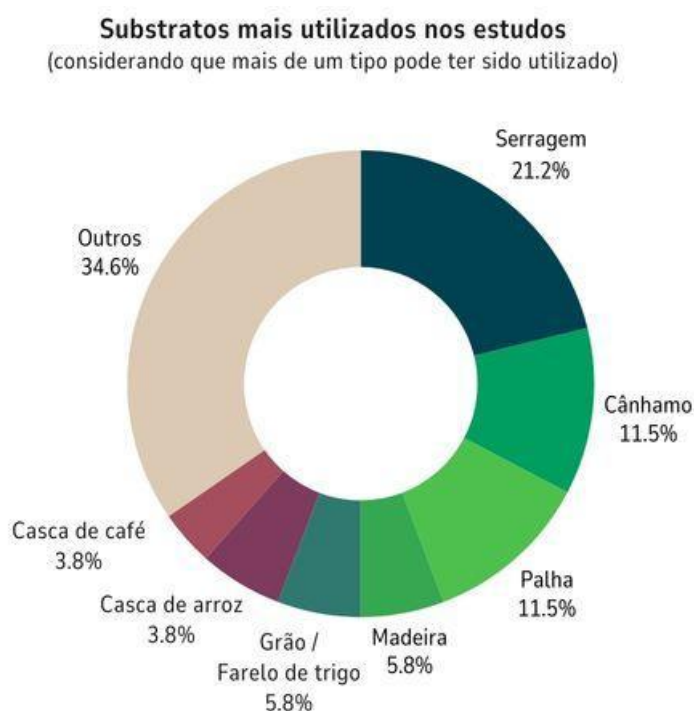
Figura 10 – Espécies fúngicas mais utilizadas nos estudos.



Fonte: A autora.

(b) Os resíduos mais utilizados foram serragem (21,2%), cânhamo ou resíduos têxteis (11,5%), palha (11,5%), seguido de madeira (5,8%), farelo ou grãos de trigo (5,8%) e casca de arroz (3,8%). A casca ou borra de café aparecem em dois estudos, representando 3,8% das amostras estudadas, indicadas na Figura 11.

Figura 11 – Resíduos mais utilizados nos estudos.



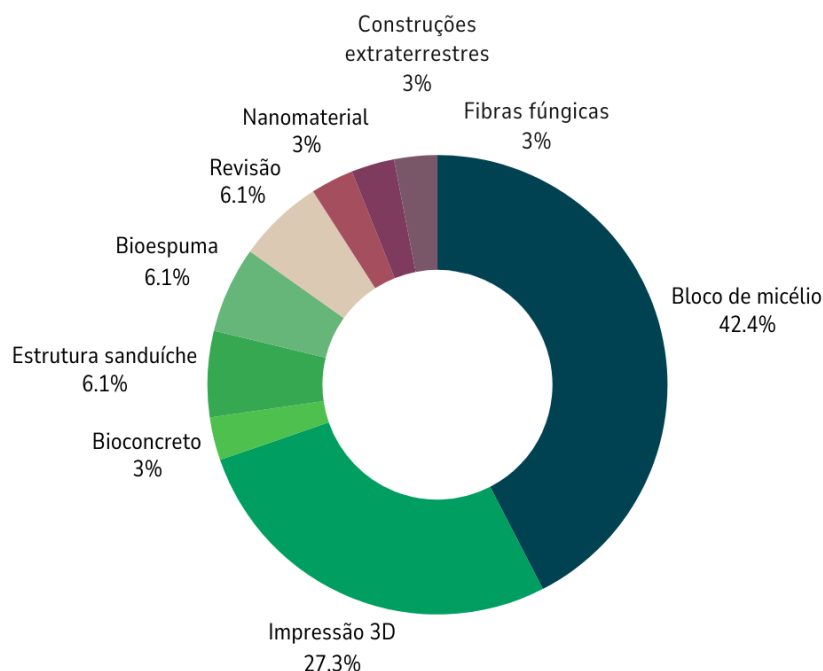
Fonte: A autora.

A partir dessas informações, é possível fazer algumas correlações entre a escolha do resíduo e respectivos países de origem. Como esperado, a serragem e a madeira aparecem na maior parte desses artigos, mas vale ressaltar também, os estudos com grãos de centeio/trigo nos Estados Unidos, considerando que é um material amplamente produzido no país, e os estudos utilizando cânhamo em países europeus (Alemanha e Reino Unido), considerando que o cultivo dessa planta tem aumentado na União Europeia nos últimos anos.

(c) As aplicações mais comuns das amostras foram para bloco ou placa de micélio (42,4%), para compósitos impressos em 3D (27,3%), seguidos de parede ou estrutura sanduíche de madeira com forramento em micélio (6%), bioespumas (6%), bioconcretos (3%), e dois estudos que também elaboraram revisões da literatura (6%), mas que foram ignorados nesse contexto por apresentarem diversas aplicações, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12– Elementos e/ou aplicações mais desenvolvidas nos estudos.

Elementos / aplicações mais desenvolvidas nos estudos



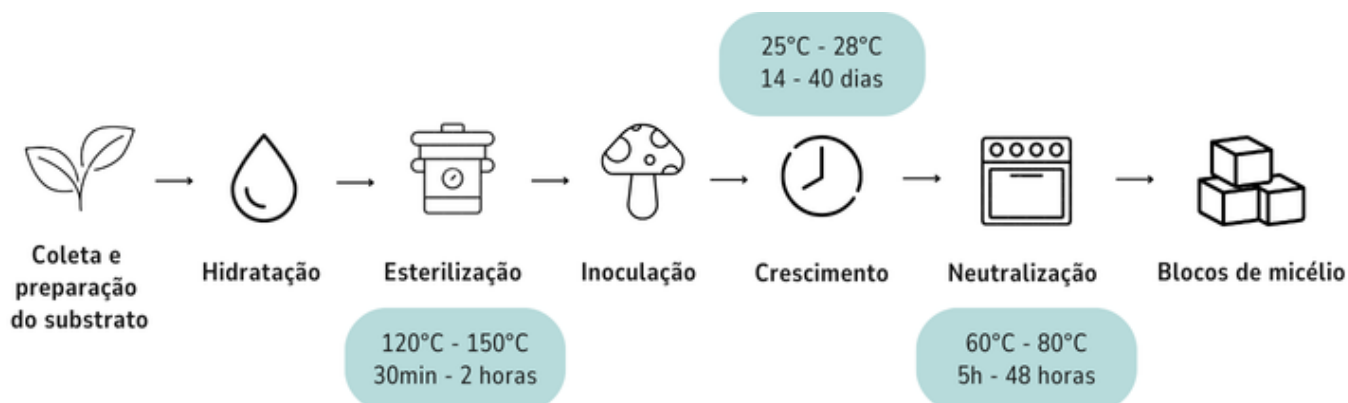
Fonte: A autora.

3.2. Modo de produção, caracterização e principais propriedades

A literatura disponível na área de materiais à base de micélio é limitada, pois acaba reproduzindo diferentes metodologias. Além disso, falta um padrão na apresentação comparativa dos parâmetros de produção, que, por sua vez, são influenciados por fatores como a espécie fúngica, os resíduos utilizados, e outros parâmetros variáveis derivados do processo de produção, que também dependem de condições laboratoriais específicas (Barta *et al.*, 2024). Diante disso, a produção do bloco (painel ou placa) de micélio variou muito em cada estudo devido a escolha do resíduo, espécie fúngica e aplicação desejada.

Em síntese, o processo mais comum é demonstrado pela Figura 13. Assim, após a escolha do resíduo, o material é embebido em água destilada, sofrendo o processo de hidratação, sendo esta primeira etapa primordial para o crescimento fúngico. Em seguida, a mistura é homogeneizada para aumentar a área de superfície de crescimento.

Figura 13– Modo de produção dos blocos de micélio mais citado nos artigos.



Fonte: Bagheriehnajjar, Yousefpour e Rahimnejad (2023); Zhang *et al.* (2023); Lingam *et al.* (2023); Saez *et al.* (2022); Özdemir *et al.* (2022) adaptado pela autora.

O material macerado ou picotado é então esterilizado em estufa úmida a 120°C ou estufa seca em até 150°C, com tempo variando de no mínimo 30 minutos e no máximo 2 horas respectivamente, para remover bactérias e microrganismos existentes. Depois desse processo, o material resfriado é despejado em moldes (com formato da geometria desejada) iniciando o processo de colonização ou crescimento dos fungos. Após a inoculação, em que o as sementes inoculadas com o fungo são misturadas com o resíduo, o material é armazenado em um ambiente sem contato com a luz solar, a uma temperatura de 25°C a 28°C, por um período de crescimento de em média 14 dias, a depender da espécie fúngica, do resíduo utilizado, e da temperatura mantida. Em seguida, os compósitos podem ser removidos dos moldes e prensados a quente ou secos em estufa, para desidratar e neutralizar o crescimento fúngico, endurecendo o material. Outros tipos de revestimento e pós-processamentos podem ser aplicados ao material para melhorar suas propriedades mecânicas (Bagheriehnajjar; Yousefpour; Rahimnejad, 2023; Zhang *et al.*, 2023; Lingam *et al.*, 2023; Saez *et al.*, 2022; Özdemir *et al.*, 2022).

Dessa forma, foi elaborado uma planilha (Tabela 1) resumindo como o processo de produção ocorreu nos principais estudos, ou seja, como desenvolveram as etapas indicadas em seus experimentos.

Tabela 1 – Resumo dos processos de produção encontrados nos artigos.

Autor, ano	Mistura e hidratação	Esterilização	Inoculação	Colonização	Pós-processamento
Bagheriehnajj; Yousefpour; Rahimnejad, 2023	Não foi citado	Não foi citado	As sementes foram misturadas ao resíduo e colocado em sacos de polipropileno por 5 dias	A mistura foi transferida para moldes, que ficaram em crescimento por 10 dias a 28°C, depois os moldes foram retirados, ficando em repouso por 8 dias	Estufa a 70°C por 10 horas
Zhang <i>et al.</i> , 2023	Colocou a mistura em sacos de polipropileno	Em autoclave a 121°C por 30 minutos	Não foi citado	Foi para incubadora a 27°C (67% de UR) por 14 dias	Estufa a 60°C por 12h
Lingam <i>et al.</i> , 2023	Triturou os resíduos em partes menores e hidratou por 24h	Em estufa a 150°C por 2 horas	Colocou as sementes do fungo, e depois em moldes	Crescimento ocorreu entre 30 a 42 dias	Seco (forno ou sol)
Saez <i>et al.</i> , 2022	A mistura foi inoculada com esporos fúngicos. Na 1ª vez, foi incubada por 7 dias (20° a 28° com 90% de UR), depois foram colocados em moldes e incubados pela 2ª vez, por 10 dias (20°C a 30°C com 90% de UR). Por fim, os dois blocos foram colados pelo micélio, e incubados pela última vez, durante 30 dias (15°C a 30°C com 90% de UR).				Desnaturar a 65°C a 90°C com UR de 12%.
Özdemir <i>et al.</i> , 2022		Em estufa a 121°C por 60 minutos	Recebeu as sementes do fungo	O crescimento ocorreu em 14 dias, com temperatura média de 27°C e umidade relativa de 70% a 80%	Após a formação das hifas fúngicas, o material foi transferido para os moldes, e depois levado para uma estufa de secagem a 65°C durante 2 a 3 dias.

Fonte: A autora.

Reforça-se que os modos de produção apresentados variam muito de acordo com a espécie fúngica e o resíduo utilizado, bem como os equipamentos, que por sua vez, podem variar a temperatura e o tempo de crescimento. Nesse sentido, foram analisados vários estudos e modos de produção até encontrar o que mais se adequou para a realidade brasileira, e assim, foi desenvolvido um método experimental coerente, que será relatado no Capítulo 4 desta pesquisa.

Em relação a análise de suas resistências, o micélio oferece boas propriedades térmicas e mecânicas (dependendo da aplicação pretendida), incluindo a compressão. Este biomaterial pode substituir produtos sintéticos tradicionais derivados do petróleo usados como isolantes térmicos e acústicos, como o poliestireno expandido (EPS), que é amplamente utilizado atualmente, mesmo sendo classificado como cancerígeno humano e não biodegradável (Bruscatto *et al.*, 2019).

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos dados relativos à composição dos materiais (foram selecionados apenas os estudos com *Pleurotus ostreatus*), bem como os valores correspondentes de densidade, condutividade térmica e resistência à compressão. A análise destas informações é necessária para validação posterior dos resultados obtidos no Capítulo 4 desta pesquisa. Os demais valores referentes as outras espécies encontradas na revisão foram detalhadas no Apêndice.

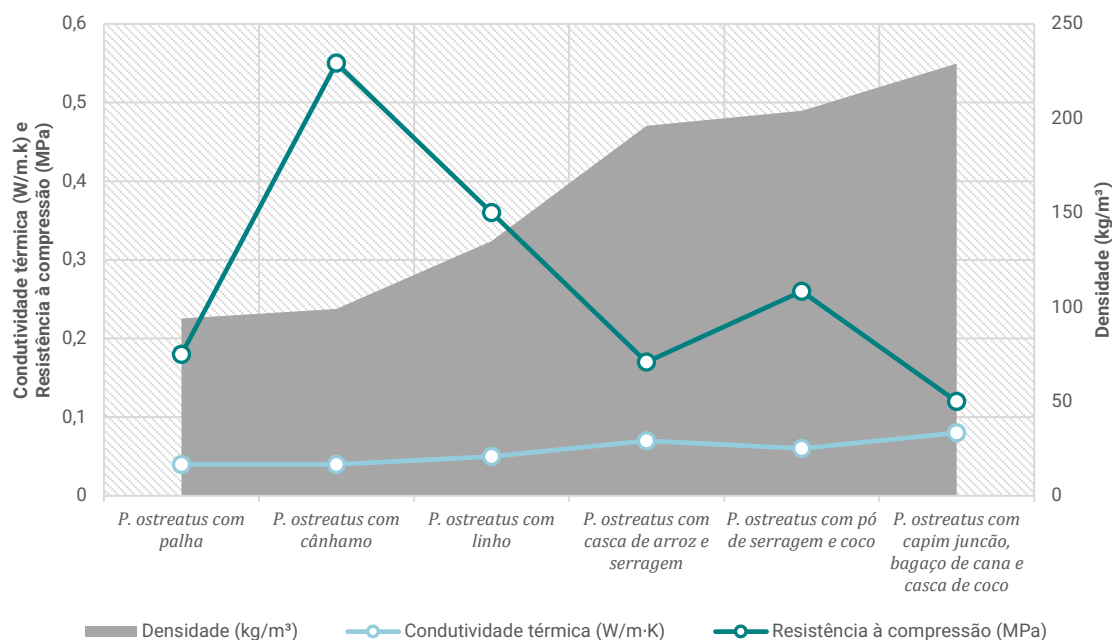
Tabela 2 – Valores de densidade, condutividade térmica e resistência a à compressão, segundo os autores encontrados na literatura e suas respectivas composições (espécie fúngica e resíduos).

Autor, ano	Composição da mistura	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m·K)	Resistência à compressão (MPa)
Mbabali <i>et al.</i> , 2024	<i>Pleurotus ostreatus</i> com casca de arroz e serragem, pó de serragem e coco	196-204	0,06-0,07	0,01-0,4
Al-Qahtani, Koç e Isaifan, 2023	<i>Pleurotus ostreatus</i> com grãos de centeio	599	0,07	-
Grenon, Maref e Ouellet-Plamondon, 2023	<i>Pleurotus ostreatus</i> e aparas de madeira	100-390	0,03	-
Lingam <i>et al.</i> , 2023	<i>Pleurotus ostreatus</i> com capim junção, bagaço de cana e casca de coco	229	0,06-0,1	0,01-0,07
Alemu, Tafesse e Deressa, 2022	<i>Pleurotus ostreatus</i> e casca de café	292,35	-	0,2
Ghazvinian e Gürsoy, 2022	<i>Pleurotus ostreatus</i> com serragem e palha	-	-	0,15
Elsacker <i>et al.</i> , 2019	<i>Pleurotus ostreatus</i> com linho, cânhamo e palha	94-135	0,04-0,05	0,14-0,5

Fonte: A autora.

Foi elaborado o gráfico, ilustrado na Figura 14, a fim de determinar uma relação entre densidade, condutividade térmica e resistência encontrados na literatura. Foram selecionados apenas os artigos que continham os dados referentes aos três eixos para facilitar a análise.

Figura 14 – Gráfico demonstrando a relação entre os valores encontrados na literatura entre densidade, condutividade térmica e resistência à compressão.



Fonte: Elsacker *et al.* (2019), Lingam *et al.* (2023) e Mbabali *et al.* (2024), adaptado pela autora.

Observou-se uma relação linear crescente entre os valores de densidade e condutividade térmica, indicando que estes parâmetros exibem um aumento proporcional. Já a resistência à compressão não demonstrou uma correlação direta com os demais eixos. Tal constatação sugere que o tipo de resíduo utilizado e o tempo de colonização do fungo exercem maior influência nos resultados de resistência mecânica do que a densidade isoladamente (Alemu, Tafesse e Deressa, 2022), porque o nível nutricional do substrato melhora a ligação interna das partículas (Livne *et al.*, 2024) e consequentemente melhora a rigidez do material.

Adicionalmente, nota-se que o micélio exibe propriedades de isolamento térmico ideais, em virtude da sua baixa condutividade térmica, baixa densidade (pela sua estrutura porosa) e baixa resistência mecânica (Al-Qahtani, Koç e Isaifan, 2023). Por conta disso, não deve ser utilizado como material estrutural, sendo mais adequado para embalagens, foramentos, painéis isolantes, divisórias, enchimento de portas ou espumas (Lingam *et al.*, 2023).

Além de um bom isolante térmico, o micélio também possui bom desempenho acústico de baixa frequência. Os melhores resíduos para absorção acústica foram a palha de arroz (52 dBa), cânhamo (53 dBa), linho (53,5 dBa) e fibra do cereal sorgo (54 dBa). Esta condição ocorre dada a natureza porosa e fibrosa dos compósitos de micélio, sabendo que materiais menos densos absorvem melhor os sons de baixa frequência, enquanto materiais mais densos são melhores para frequências mais altas (Jones *et al.*, 2020).

Os demais valores dos resultados obtidos nos ensaios e testes mecânicos realizados, encontrados na literatura, podem ser consultados no Apêndice.

3.3. Principais aplicações na Arquitetura

Em relação às aplicações arquitetônicas, o método mais comum é a montagem de pequenos blocos que formam uma estrutura maior, isso porque, de acordo com Abdelhady, Spyridonos e Dahy (2023), o micélio possui boas propriedades mecânicas de compressão. Um dos primeiros exemplos construtivos que adotou o micélio em larga escala foi a *Hy-Fi Tower* (Figura 15), um pavilhão construído em Nova York, em 2014, desenvolvido em parceria com o estúdio de arquitetura *The Living* e a empresa *Ecovative Design*, que possui expertise no desenvolvimento de biomateriais. Para esta construção foram confeccionados tijolos de micélio, produzidos em menos de uma semana a partir de resíduos de talos de milho picados, misturados dentro de moldes, se solidificaram e conseguiram erguer uma torre de 12 metros de altura. Ao fim da exposição, a estrutura foi desmontada e os tijolos foram transportados de volta para as composteiras.

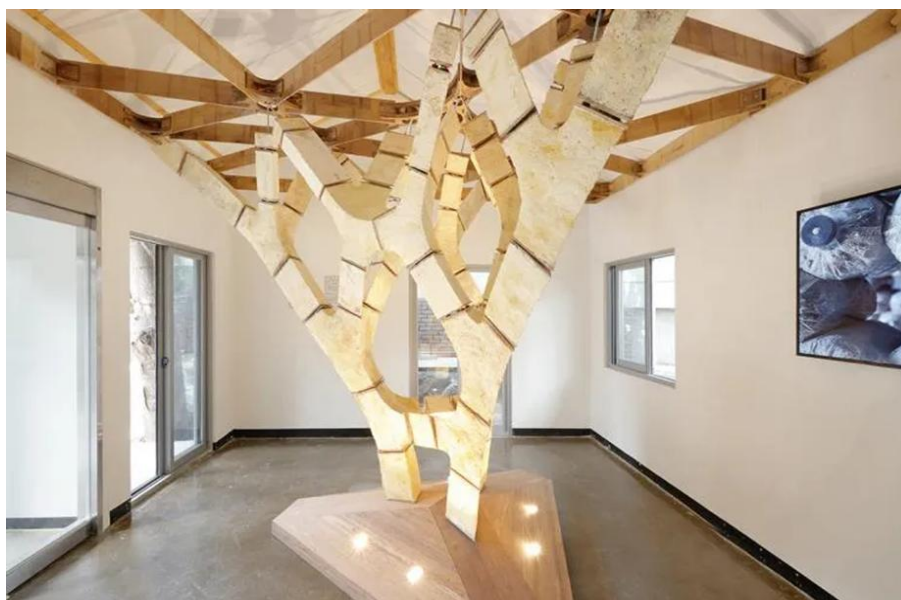
Figura 15 – Hy-Fi Tower.



Fonte: Archdaily, 2020.

Outro exemplo é a MycoTree (Figura 16), do Instituto de Tecnologia alemão de Karlsruhe, do Grupo de Pesquisa de Zurique e o Laboratório de Futuras Cidades de Singapura, exibido na Bienal de Arquitetura e Urbanismo de Seul em 2017. O projeto utilizou ferramentas digitais para projetar a geometria de cada componente, utilizando sua capacidade estrutural de compressão. No processo, placas de bambu e peças de metal foram incorporadas aos blocos de micélio, funcionando como uma espécie de junta, transferindo as cargas de uma peça para outra.

Figura 16 – MycoTree.



Fonte: Teteris, 2017.

Além desses exemplos, existem outros protótipos arquitetônicos sendo desenvolvidos, especialmente na última década. É importante destacar, inclusive, a produção dos autores Abdelhady, Spyridonos e Dahy (2023), que desenvolveram uma pesquisa no intuito de fabricar peças de micélio em pequena escala, para serem aplicadas em sistemas modulares, interligadas por meio de um sistema de intertravamento. O estudo envolveu simulação computacional, testando vários tipos de módulos até alcançar o formato ideal de encaixe entre as peças, resultando em uma forma geométrica que isentasse o uso de peças extras para fixação. Como resultado, a pesquisa evidencia a importância de identificar as características e propriedades dos blocos de micélio, além de incentivar o uso de programas computacionais para o desenvolvimento de geometrias construtivas mais complexas.

Os blocos de micélio têm sido usados para diversas aplicações, desde embalagens, divisórias para isolamento, até utensílios e móveis (Alemu, Tafesse e Deressa, 2022). Outros estudos exploram a viabilidade e o potencial do uso de micélio para impressão

3D, considerando o crescimento das espécies *Pleurotus ostreatus* (Mohseni et al., 2023; Ilgun e Schmickl, 2023; Jauk et al., 2022; Modanloo et al., 2021) e *Ganoderma lucidum* (Mohseni et al., 2023), utilizando resíduos de papel e papelão e argila. Esses estudos, apesar de terem executado pastas extrudáveis com micélio, apontaram grande dificuldade em relação ao alto potencial de contaminação do material, principalmente com a espécie *Ganoderma lucidum*.

A interação entre o micélio e outros materiais naturais também é pauta na literatura recente. Kaiser et al. (2023) exploram o potencial da fabricação de biohíbridos têxteis visando a aplicação na construção civil, enquanto Ghazvinian e Gürsoy (2022) apostam no reaproveitamento de resíduos de serragem e palha junto ao micélio como uma solução para elementos de construção leves. Em adição, existem pesquisas que abordam o uso de nanofibras como forma de favorecer mecanicamente o micélio (Trabelsi et al., 2021) e seu potencial em construções na Terra, na Lua e em Marte (Lipińska et al., 2022).

Nesse contexto, percebe-se que há muitas formas de aplicar o material na Arquitetura, dentro e fora da Terra. A partir disso, constata-se a importância de compreender como o material está sendo aplicado e até que ponto as pesquisas estão avançando nesse sentido.

3.3.1. Impressão 3D com micélio

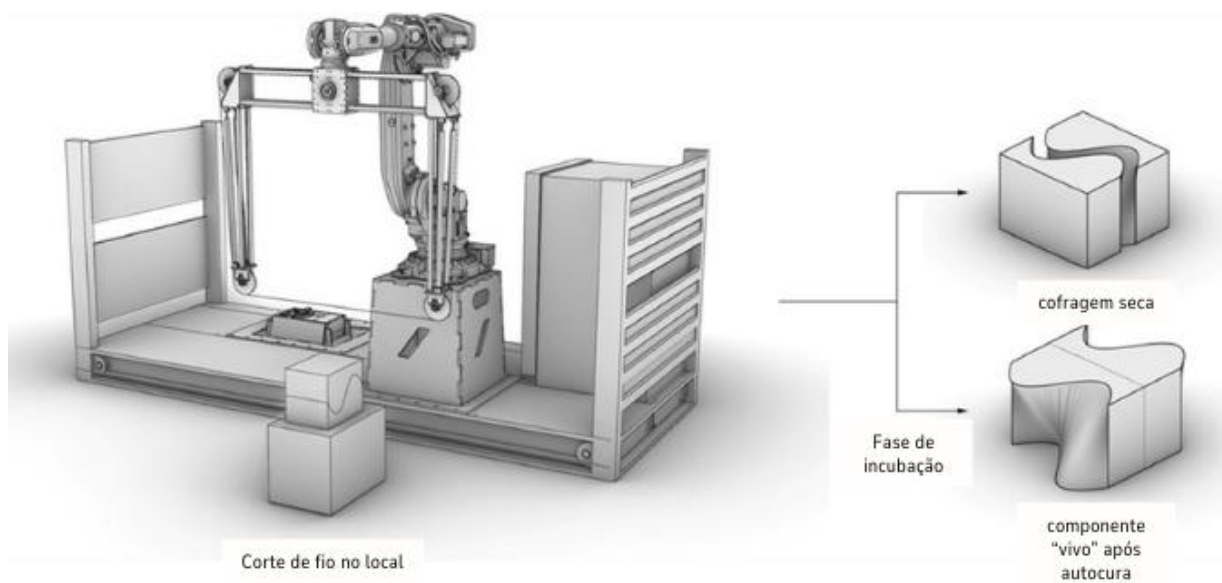
Sabe-se que os compostos à base de micélio podem ser moldados de diferentes formas, usando técnicas variadas de moldagem e até mesmo por fabricação digital. Como visto, essa versatilidade permite uma série de implementações na Arquitetura, especialmente em aplicações térmicas e acústicas, dado o potencial do material nesse quesito.

Até o início da desta década, Elsacker et al. (2021) apontam que os compósitos de micélio estavam sendo desenvolvidos comercialmente como materiais para embalagem, painéis de isolamento térmico (desenvolvido pela empresa italiana *Mogu*) e telhas acústicas (desenvolvido pela empresa americana *Ecovative*). Alertam que ainda existe uma lacuna para a comercialização real, em larga escala, do produto para aplicações arquitetônicas. O único exemplo até então teria sido os tijolos do *Hy-fi Tower*, produzidos pela *Ecovative* (em 2014), em que os autores supõem que a empresa teria inserido tubos de aeração no resíduo durante o processo de crescimento, pois a maioria dos produtos à base de micélio tem uma espessura máxima de 150 mm, que é justificada pela necessidade aeróbica do organismo para crescer de forma ideal.

Desse modo, o objetivo da pesquisa de Elsacker *et al.* (2021) foi compreender como elaborar um protótipo, a partir de fabricação robótica, em larga escala. Para isso, desenvolveram: (i) um método para a fabricação de blocos em camadas em grande escala; (ii) corte de uma superfície com um robô industrial em condições não estéreis; (iii) combinação de diversas funcionalidades e materiais à base de micélio; e (iv) unir dois blocos vivos para obter propriedades de autocura. Normalmente, os materiais de micélio são desidratados para tornar o compósito inerte. Nesse estudo, os autores desenvolveram uma nova metodologia de fabricação (Figura 17) em que o material permaneceu vivo, considerando que ao danificar ou quebrar a rede micelial durante o crescimento, foi estimulado a formação de uma rede mais robusta e densa (Elsacker *et al.*, 2021).

Duas espécies diferentes foram utilizadas neste estudo: *Trametes versicolor* e *Ganoderma resinaceum*. Os resíduos foram a madeira de faia e cânhamo. Após o processo de corte, o componente vivo foi remontado formando uma ligação entre os dois elementos cortados e estimulando a regeneração de uma película externa de micélio (Figura 17). As duas peças foram colocadas lado a lado em sala de incubação com temperatura de 26°C. O aumento da umidade foi necessário, e permitiu que as hifas continuassem a crescer por extensão da ponta e preenchessem lacunas de 5 mm entre os dois elementos. Após sete dias de incubação, os dois elementos estavam totalmente conectados. Finalmente, o bloco foi seco ao ar numa sala de incubadora a 30°C durante uma semana e permaneceu sólido (Figura 17).

Figura 17 - Fluxo da produção, demonstrando o processo de crescimento biológico e o processo robótico de fabricação de componentes à base de micélio.



Fonte: Elsacker *et al.* (2021) traduzido pela autora.

Os resultados de Elsacker *et al.* (2021) demonstram que existe um enorme potencial (pouco explorado) considerando diferentes processos de crescimento do micélio, integrando práticas biológicas, arquitetônicas e de engenharia, o que permitiria a produção *in loco* do material, em escalas maiores do que tem sido feitas em laboratório. Além disso, o potencial da autocura, ao manter o organismo vivo durante o processo de fabricação robótica, pode desempenhar um papel muito importante no desenvolvimento de geometrias mais complexas, sem a necessidade de argamassa, cola ou conectores.

3.3.2. Bioespumas com micélio

Assim como o micélio, os materiais acústicos sustentáveis, de modo geral, têm ajudado a melhorar o conforto acústico em ambientes construídos, e sua utilização tem crescido rapidamente na indústria da construção (Arenas e Sakagami, 2020).

As pesquisas mais recentes na área de produção de bioespumas têm apresentado resultados positivos como alternativa sustentável em relação aos absorvedores acústicos tradicionais (normalmente à base de petróleo). De acordo com Pelletier *et al.* (2019), a criação de espumas à base de micélio tem a capacidade de reduzir a energia necessária no processamento de fabricação dos produtos químicos utilizados na criação de espumas convencionais, como o EPS (poliestireno expandido). Bruscato *et al.* (2019) estimam que se 50% do mercado de embalagens fosse substituído por bioespumas, seria reduzido em torno de 20% do volume em toneladas produzidas pelo mercado global de EPS.

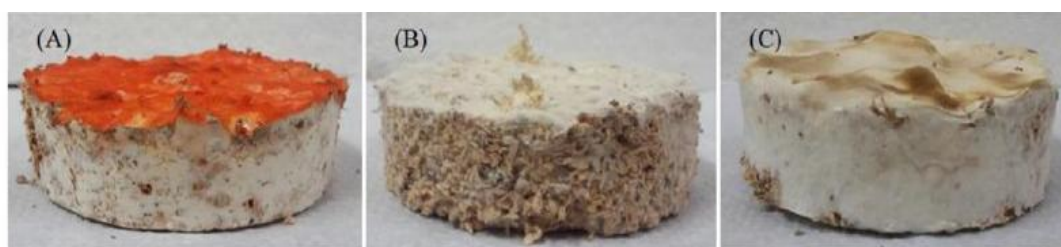
A título de maior compreensão do desenvolvimento dos estudos acerca das bioespumas, apresenta-se brevemente o estudo de dois autores: Mbabali *et al.* (2024) e Bruscato *et al.* (2019), citados durante a revisão realizada no Apêndice. Mbabali *et al.* (2024) empregaram *Pleurotus ostreatus* como espécie fúngica aglutinante de cascas de arroz e serragem para produzir uma bioespuma de isolamento.

Os resultados demonstram que as bioespumas possuem propriedades similares aos estudos que desenvolveram blocos ou placas de micélio, reforçando o ponto de que são excelentes isolantes térmicos. Os biocompósitos à base de micélio desenvolvidos eram leves, em uma faixa de 153–239 kg/m³, e condutividade térmica de 0,07W/m.K (Mbabali *et al.* 2024). Observou-se também que os materiais compósitos à base de micélio são adequados para aplicações em produtos resistentes ao fogo. Isso já havia sido observado por Jones *et al.* (2018), que a lignina e o fósforo presentes na casca de arroz e no micélio foram responsáveis pelas características de retardamento de fogo dos compósitos. No entanto, vale ressaltar que esses resultados obtidos podem variar muito de acordo com o resíduo utilizado,

não sendo uma afirmação que deve ser generalizada para todos os estudos. O ideal é que todas as pesquisas testem a composição adequada de fungos, resíduos e aditivos para determinar e garantir o desempenho do compósito em relação à segurança contra incêndio.

A pesquisa de Bruscato *et al.* (2019) é originada na Universidade de Caxias do Sul, no Brasil. Em seus estudos, utilizaram uma mistura com serragem da madeira pinus, farelo de trigo moído e carbonato de cálcio, das seguintes espécies: *Pycnoporus sanguineus* (Figura 18A), *Pleurotus albidus* (Figura 18B) e *Lentinus velutinus* (Figura 18C). Teve como principais resultados as resistências à compressão nos valores de 1,3, 0,4 e 1,3 MPa para *P. sanguineus*, *P. albidus* e *L. velutinus*, respectivamente. Em relação a estabilidade térmica foi inferior à do EPS, mas manteve-se estável até 350°C, e apresentou uma densidade maior, variando de 30 a 300 kg/m³ (Bruscato *et al.*, 2019).

Figura 18 - Registro fotográfico das bioespumas obtidas através das espécies: (A) *Pycnoporus sanguineus*, (B) *Pleurotus albidus* e (C) *Lentinus velutinus*.



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

Por fim, Bruscato *et al.* (2019) reforçam que os resíduos utilizados na conversão da bioespuma, resultaram num menor impacto ambiental, dado que consomem menos produtos derivados do petróleo. Além disso, mesmo que a bioespuma seja depositada em aterros sanitários, ela contribuiria com o processo de degradação de outros materiais, pois sua composição facilita o desenvolvimento de outros microrganismos, e por serem biodegradáveis, podem ser utilizadas como fertilizante de solo.

3.3.3. Concreto à base de micélio

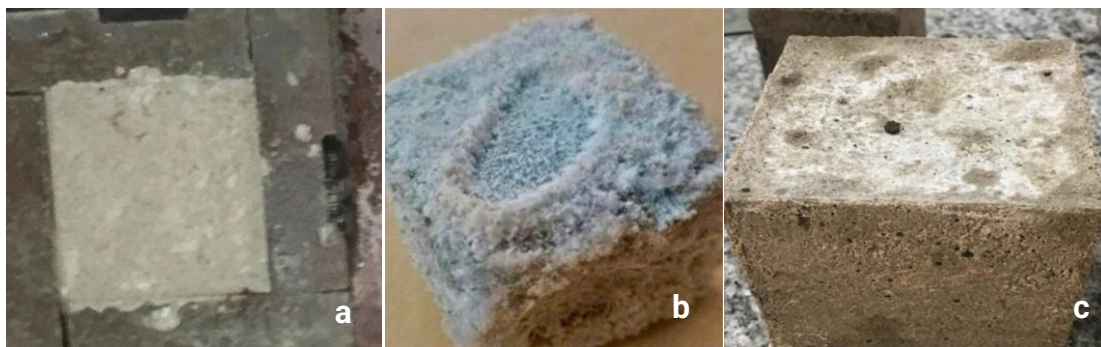
A incorporação de resíduos de cogumelos e micélio em materiais de construção pode proporcionar melhorias em várias propriedades, incluindo o isolamento térmico e acústico. Este tópico aborda exclusivamente a pesquisa de Ardra *et al.* (2024) que analisou a possibilidade de utilização do “concreto de micélio” para paredes não estruturais, realizando um estudo experimental que levou em conta diversas técnicas, incluindo tijolos geopoliméricos com infusão de micélio, mistura de micélio-epóxi

coberta com concreto geopolímero, e argamassa de cimento com infusão de micélio (Ardra *et al.*, 2024).

Em um primeiro momento foram preparados tijolos de geopolímero, depois uma mistura de epóxi foi adicionada, para atuar como um aglutinante. A integração da mistura epóxi de micélio e da mistura de geopolímero teve como objetivo obter os benefícios combinados de ambos os materiais, aproveitando as propriedades de isolamento térmico inerentes ao micélio e a resistência e estabilidade do geopolímero. No entanto, durante o experimento, constatou-se que o epóxi tinha compatibilidade coesiva baixa com o concreto geopoliméricos, e por conta disso, o epóxi foi substituído por uma combinação de silicato de sódio e hidróxido de sódio. Nesta segunda tentativa, o agregado fino do tijolo geopolímero e as cinzas volantes são substituídos por pó de micélio, resultando em um tijolo geopolímero à base de micélio (Figura 19A). No entanto, ao fundir o micélio bruto a mistura regular de argamassa, surgiram rachaduras e crescimento de fungos (pó branco) na superfície da amostra (Figura 19B), causados devido a sua tendência hidrofílica, constatando que essa abordagem era inviável. Assim, uma terceira amostra foi realizada, dessa vez o micélio sendo adicionado como substituto parcial (em quantidade específica) de cinza volante na mistura do geopolímero e para resolver totalmente a questão da absorção de água e prevenção de crescimento fúngico, o pó de micélio foi tratado em uma imersão de solução de hidróxido de sódio (NaOH) e posteriormente, seco até eliminar toda a umidade. Esse processo de tratamento com NaOH foi feito porque ele despolimeriza a parede celular da fibra do biomaterial e elimina certa quantidade de lignina, cera e óleos. Assertivamente, após isso, houve uma redução drástica da formação de pó branco na superfície dos blocos de concreto (Figura 19C) (Ardra *et al.*, 2024).

Por fim, foram realizados vários ensaios a fim de determinar as propriedades físicas e mecânicas dos blocos desenvolvidos, que chegaram a algumas conclusões, das quais valem destacar: (i) O concreto geopolímero à base de micélio (e tratado com NaOH) exibiu resistência à compressão (32,4 MPa) comparável ao concreto geopolímero normal (variou de 6 a 9 MPa), indicando sua integridade estrutural e adequação para aplicações não estruturais; (ii) Testes de condutividade térmica mostraram que concretos geopolímero à base de micélio (e tratados com NaOH) resistiram efetivamente à transferência de calor, indicando seu potencial para projetos de construção com eficiência energética e melhor conforto dos ocupantes, bem como, também demonstraram potencial para redução de ruído e melhoria do conforto acústico em edifícios (Ardra *et al.*, 2024).

Figura 19– Tijolo de argamassa à base de micélio (a); Formação de pó branco na amostra (b); Concreto geopolímero à base de micélio e tratado com NaOH (c).



Fonte: Ardra et al. (2024)

3.4. Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Os compósitos à base de micélio são um dos exemplos de materiais de construção alternativos que visam facilitar a transição para uma economia circular sustentável. O que se observou no estudo de Livne et al. (2024) é que até agora, os materiais de micélio que foram produzidos utilizaram resíduos homogêneos, e durante a fase de crescimento fúngico foram mantidos a uma temperatura controlada e fixa. Em seu estudo, analisaram que a manutenção dessa temperatura foi responsável por 73% da energia incorporada e por mais de 40% das emissões de CO₂ da produção. Assim, a pesquisa propôs estruturas monolíticas que pudessem ser cultivadas *in situ*, em locais de construção ao ar livre, pois sabe-se que em muitas regiões do mundo, ocorrem ciclos de temperatura entre 15 e 30 °C, e sob tais condições, o consumo de energia e as emissões de CO₂ poderia ser drasticamente reduzido através do crescimento fúngico em temperatura ambiente. Além disso, grandes estruturas (por exemplo, paredes de edifícios) poderiam ser cultivadas ao ar livre, no próprio local de construção. Apesar dos resultados promissores, algumas questões ainda precisam ser abordadas, como a produção do material em larga escala, pois seguindo o método, ele seria moldado em grandes quantidades no local, sendo necessário o desenvolvimento de outras tecnologias para desenvolver a mistura, esterilização e inoculação de forma automatizada (Livne et al., 2024).

Outro estudo (Volk et al. 2024) afirmaram que os blocos à base de micélio (BBM) tem um melhor impacto nas alterações climáticas do que o poliestireno expandido (EPS) e a lã de rocha, por exemplo. Já em comparação aos tijolos convencionais, os BBM têm menos impactos ambientais em termos de acidificação, alterações climáticas, escassez de água e poluição atmosférica. No entanto, uma vez que o resíduo é um produto agrícola, os BBM têm uma pontuação inferior em termos de eutrofização e utilização do solo (em comparação aos tijolos). Nesse estudo de ACV, não foram modeladas as atividades de transporte porque os dados eram insuficientes e porque

foi considerado que os resíduos seriam utilizados do próprio local. Chegaram à conclusão que a fresadora, a autoclave, o umidificador, o ventilador de laboratório, e principalmente o forno, que sozinho contribui para mais da metade do consumo de eletricidade, foram os mais consumidores de energia elétrica. Para reduzir ainda mais o impacto da escassez de água do BBM, recomendaram uma mudança do resíduo para outro tipo, como milho, algodão, soja, trigo ou arroz (Volk *et al.* 2024).

Assim como o estudo de Livne *et al.* (2024), também ressaltam que um dos maiores desafios na produção de materiais de micélio é o ciclo de produção prolongado de 2 a 3 semanas, que impõe restrições econômicas à produção em grande escala. Além disso, alertam que como a avaliação do ciclo de vida foi realizada a partir de um processo laboratorial, quaisquer projeções em um nível mais alto de prontidão tecnológica ou de maior escala estão sujeitas à incerteza. Por exemplo, se um processo industrial e automatizado fosse considerado, provavelmente teriam menos águas residuais provenientes da limpeza numa máquina de lavar industrial ao invés da limpeza manual das ferramentas utilizadas, e principalmente, haveria um menor consumo de eletricidade na câmara de crescimento, moagem e estufa de secagem devido aos efeitos de sinergia, dada à plena utilização do equipamento. Todos estes aspectos poderiam levar a um menor impacto ambiental por unidade funcional. Por fim, alertam que as análises de ACV dos BBM ainda são limitadas e que faltam mais estudos comparativos levando em conta as diferentes combinações entre resíduos e espécies fúngicas utilizadas (Volk *et al.* 2024).

Em resumo, este capítulo apresentou as possíveis aplicações com o micélio na construção civil, por meio da revisão da literatura. Este entendimento foi fundamental para compreensão dos ensaios que deveriam ser realizados, e quais valores de referência deveriam ser encontrados, especialmente em relação as propriedades físicas e térmicas do material. Além dessas informações, esse repertório também foi útil na orientação do método experimental desenvolvido na pesquisa, apresentado adiante.

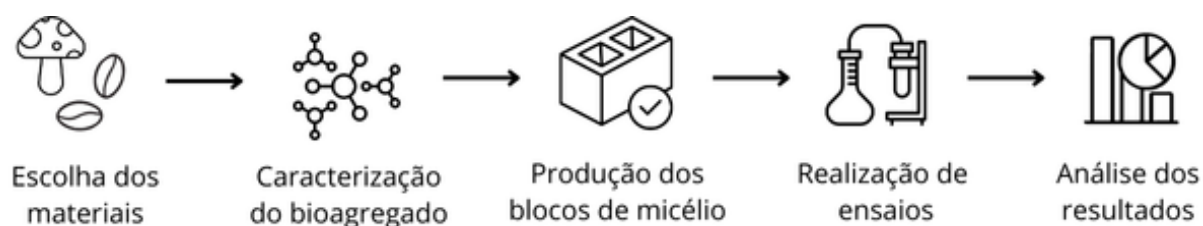
CAPÍTULO 4

Método experimental

4.1. Contextualização e objetivos

Nesta seção apresentou-se o método experimental, que seguiu as seguintes etapas em ordem cronológica, como demonstradas na Figura 20: (i) escolha dos materiais constituintes (espécie fúngica e resíduo); (ii) caracterização do bioagregado; (iii) produção da lã isolante de micélio; (vi) realização de ensaios para determinação das propriedades físicas e microestruturais do micélio; (v) análise dos resultados obtidos.

Figura 20 – Fluxograma do método utilizado no método experimental.



Fonte: A autora.

Os ensaios realizados na primeira e terceira etapa ocorreram no Laboratório de Microbiologia do Petróleo, da Escola de Química, na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Os demais ensaios foram desenvolvidos nos laboratórios do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS) da COPPE, e no Centro de Pesquisas e Caracterização de Petróleo e Combustíveis (COPPEComb) do Programa de Engenharia Química, ambos da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

4.2. A escolha dos materiais constituintes

A espécie *Pleurotus ostreatus*, pertencente ao Filo das Basidiomycota, da ordem das Agaricales e do gênero *Pleurotus*, apresenta grande potencial no Brasil em razão da sua facilidade de cultivo, devido ao clima, que é propício para o desenvolvimento do fungo. Deste gênero, *Pleurotus*, são encontradas várias espécies comestíveis, inclusive o *Pleurotus ostreatus*, popularmente conhecido como shimeji branco ou cogumelo Ostra Branco (Eira, 2010).

Essa espécie também é conhecida por sua podridão branca, característica dos decompositores eficientes na degradação da lignina, uma macromolécula presente nas plantas, principalmente, na madeira e seus derivados, como papel e papelão (Galvagno e Forchiassin, 2010).

De acordo com a revisão da literatura, percebeu-se que os gêneros *Pleurotus*, *Trametes* e *Ganoderma*, fungos de podridão branca, foram os mais utilizados devido a sua resistência à contaminação e crescimento mais rápido das hifas miceliais do que outras espécies (Alemu, Tafesse e Deressa, 2022). Por isso, para o experimento, foram utilizadas “sementes”, ou seja, grãos de trigo já incubados com o fungo *Pleurotus ostreatus*. Esta espécie foi escolhida por ter um tempo menor de produção (15 a 20 dias) e porque apresentou sucesso em estudos anteriores. Assim, para diminuir as chances de contaminação desta fase inicial, as sementes foram compradas da empresa Fungicultura, localizada no município de Salto, São Paulo, Brasil.

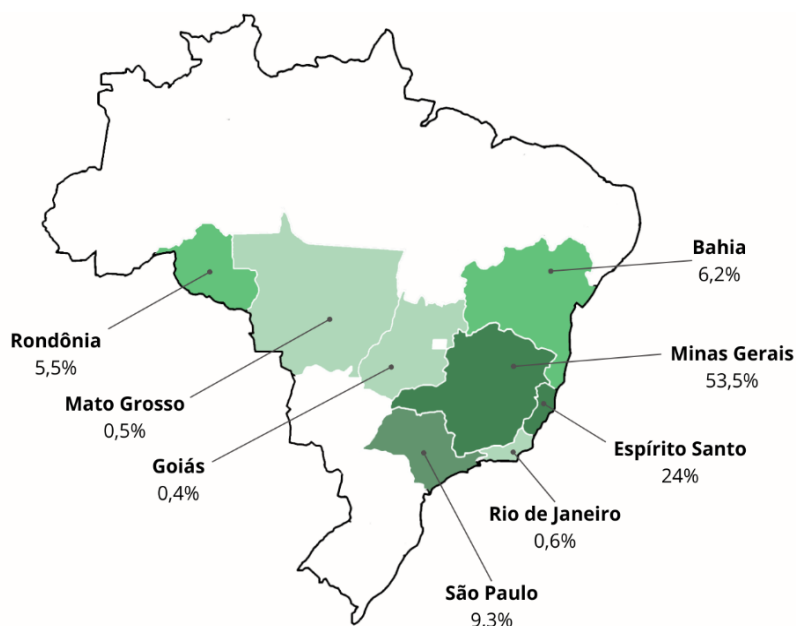
Em relação aos resíduos, inicialmente foram utilizadas a serragem de madeira pinus e a casca de café, ambas adquiridas na empresa de adubos Rofertil, proveniente de Santo Antônio de Posse, São Paulo, Brasil.

No entanto, após as primeiras tentativas de experimentação, optou-se por seguir neste estudo apenas com um único material, a casca de café. Esta decisão se baseou em dois pontos principais: (i) escolher um resíduo que já tivesse sido utilizado em pesquisas anteriores para facilitar análises e comparações do mesmo material; (ii) escolher um resíduo abundante no país, e que estivesse minimamente distribuído em diferentes regiões brasileiras, visando facilitar a produção em larga escala futuramente.

Nesse sentido, de acordo com o 4º levantamento do Acompanhamento da Safra Brasileira, foram produzidas 55 milhões de sacas de café em 2023, e a estimativa era alcançar 58 milhões em 2024. Além disso, a área total destinada à cafeicultura no país, em 2023, totalizou 2,24 milhões de hectares (CONAB, 2023), o equivalente ao estado inteiro de Sergipe destinado à produção cafeeira, ou seja, 0,26% do território nacional.

Na figura 21 foi ilustrado a produção de café, em 2023, presente em oito estados brasileiros: Bahia (com 6,2%), Minas Gerais (liderando com 53,5%), Espírito Santo (com 24%), Rio de Janeiro (com 0,6%), São Paulo (com 9,3%), Goiás (com 0,4%), Mato Grosso (com 0,5%) e Rondônia (com 5,5%). Embora a região Sudeste apareceu como a maior produtora de café, representando 87% da produção total do país, é possível ver que existe representação nas outras regiões do país (Norte, Nordeste e Centro-Oeste), mesmo que mínima (CONAB, 2023).

Figura 21 – Mapa da produção de café por estado, representados por escala de cores, em que o verde mais claro indica a menor porcentagem e o verde mais escuro, a maior.



Fonte: CONAB (2023) adaptado pela autora.

Durante a colheita e o processamento das cerejas de café, as cascas são separadas dos grãos e, comumente descartadas como resíduos (Van Nguyen *et al.*, 2023). A casca do café, representa 50% da massa do fruto colhido (Santos e Pasin, 2016). Levando em consideração que a produção em 2023 foi de 55 milhões de sacas (de 60 quilos), estima-se que foram originados 1,65 bilhões de quilos apenas da casca de café. Parte desse resíduo tem sido aproveitado como compostagem (adubo) na agricultura, mas existe uma porção que acaba sendo descartada incorretamente, gerando danos ao meio ambiente (Santos e Pasin, 2016). Portanto, sabendo que esse é um subproduto de geração perene no país e com potencial de reaproveitamento, julgou-se apropriado utilizar este material nesta pesquisa.

4.3. Caracterização da casca de café

Nos últimos anos, tem crescido o interesse em encontrar formas sustentáveis e inovadoras para o uso das cascas de café, visando a minimização do desperdício de recursos agrícolas. Atualmente, suas aplicações mais comuns têm sido como biocombustível, ração animal, fertilizante, e no cultivo de cogumelos (Van Nguyen *et al.*, 2023).

Para compreender completamente as características deste resíduo e avaliar seu potencial para futuras pesquisas, foi necessário realizar uma análise da sua composição física e química, apresentada a seguir.

4.3.1. Caracterização física

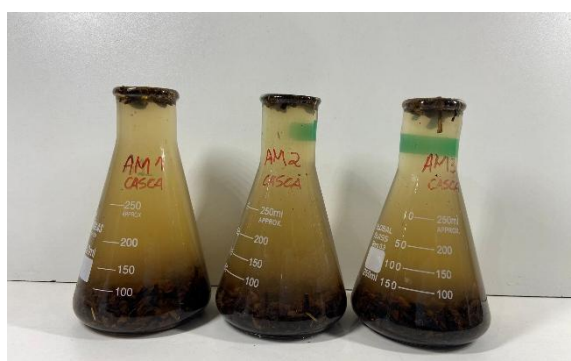
Massa específica

O processo para obtenção da massa específica das cascas de café teve como referência o protocolo utilizado por Paiva (2022) e indicado na norma ABNT NBR 16916 (2021). Salienta-se que os termos densidade e massa específica foram considerados equivalentes neste ensaio, por expressar grandezas iguais, como estabelecido na norma em questão.

Desse modo, o primeiro passo foi colocar as cascas de café em água destilada durante 24 horas para garantir a condição saturada. Depois, a água que não foi absorvida, foi escoada com o auxílio de uma peneira por cerca de 15 minutos. O material foi armazenado em uma sala sob condições controladas, seco ao ar, com temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $55\% \pm 2\%$.

Após as cascas de café atingirem a condição de saturação e superfície seca, 300 g foram distribuídas igualmente em três frascos de vidro Erlenmeyer (Figura 22), preenchidos cada um com água deionizada (500 ml). Então, os frascos foram conservados por cerca de uma hora em uma sala (sob as mesmas condições anteriores) e depois, realizou-se o registro de massa de cada amostra. Por fim, as cascas de café foram retiradas dos frascos e colocadas em estufa a 60°C até a constância da massa, ou seja, até o peso da massa seca das cascas de café se manterem constantes.

Figura 22 – Três frascos de vidro Erlenmeyer com casca de café preenchidos com água deionizada.



Fonte: A autora.

De acordo com a ABNT NBR 16916 (2021), para calcular a massa específica do agregado na condição seca utilizou-se a seguinte equação:

$$\rho_s = \frac{m_A}{(V - V_a)}$$

Onde:

ρ_s é a massa específica do agregado na condição seca, em (g/cm³);

m_A é a massa da amostra seca após a secagem em estufa, em (g);

V é o volume do frasco calibrado, em (cm³);

V_a é o volume de água adicionada ao frasco, em (cm³), obtida por meio da equação:

$$V_a = \frac{m_D - m_C}{\rho_a}$$

Onde:

m_D é a soma da massa da amostra na condição saturada da superfície seca, da massa do frasco, e da massa da água, em (g);

m_C é a soma da massa da amostra na condição saturada da superfície seca e a massa do frasco, em (g);

ρ_a é a densidade da água na temperatura do banho, em (g/cm³).

Teor de umidade

Já o teor de umidade das cascas de café secas na condição de saturação e superfície seca seguiu as especificações da norma ABNT NBR 9939 (2011). As três amostras (com aproximadamente 100g) foram colocadas em estufa, com temperatura de 100°C ± 2°C, onde foram mantidas até apresentarem constância de massa, ou seja, quando a diferença entre as duas últimas pesagens não indicasse mais que 0,1% de perda de massa da amostra. Para calcular o teor de umidade total, foi utilizado a seguinte equação:

$$h = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100$$

Onde:

h = teor de umidade total, em (%)

M_i = massa inicial da amostra, em (g)

M_f = massa final da amostra seca, em (g)

Absorção de água

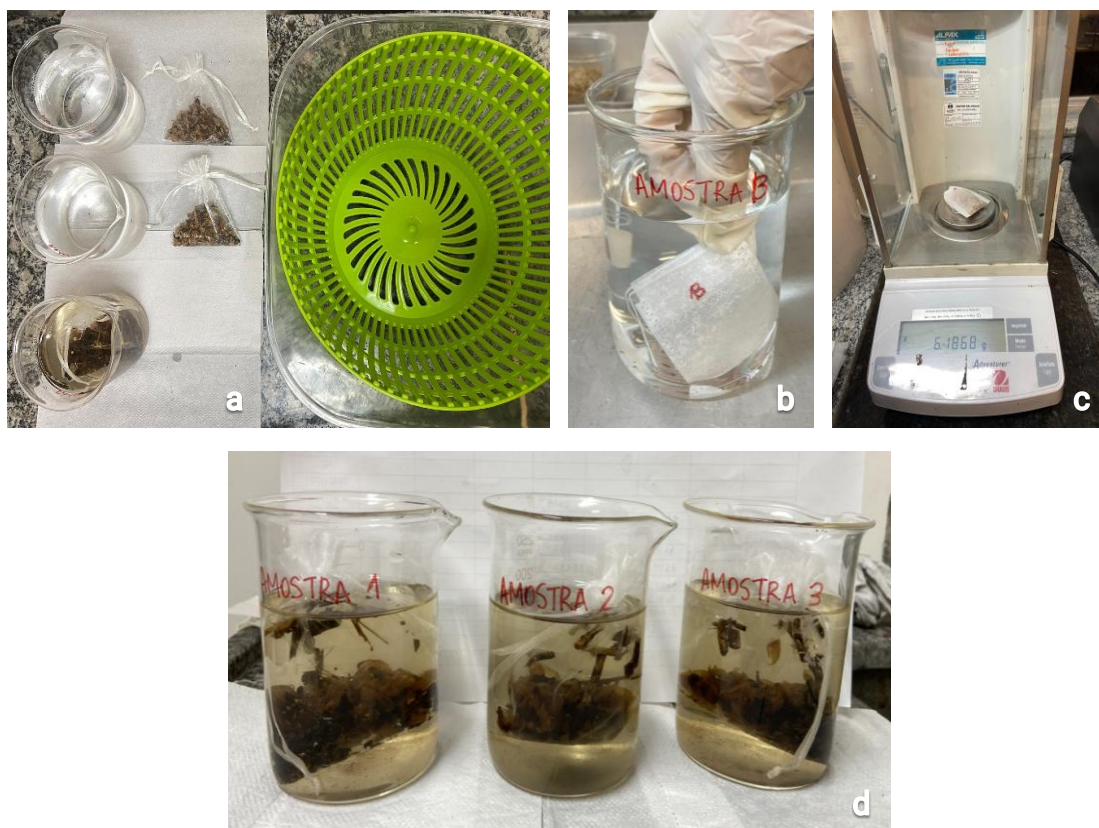
O protocolo para medir a absorção de água foi adaptado pelas recomendações de Viel, Collet e Lanos (2018) e de Tinoco *et al.* (2023). A medição utilizou quatro sachês permeáveis de organza e um centrifugador de salada (Figura 23a).

Foram colocados cerca de 2g de casca de café (previamente secas em estufa por 24h a 60°C) em três sachês, como indicado a esquerda da Figura 23a. Em seguida, cada amostra com a casca de café seca foi pesada, incluindo o sachê vazio, sem as

cascas de café. Depois, as amostras foram imersas em água (Figura 23d) e o tempo começou a ser cronometrado, de forma que as imersões ocorreram em intervalos de: 1,2,5,10, 15, 30, 60, 90, 120, 150 minutos, e 24 horas após a primeira pesagem.

Assim, após o término do tempo t , o sachê, com e sem o bioagregado (Figura 23b), foi retirado da água, colocado na centrífuga e girado uma única vez por 30 segundos, para eliminar a água absorvida na superfície das cascas ou localizada entre elas. Após esse tempo, o sachê foi retirado da centrífuga e pesado novamente (Figura 23c). O processo foi repetido para cada uma das três amostras, incluindo o sachê vazio, seguindo os intervalos de tempo mencionados.

Figura 23 – Processo de absorção de água das cascas de café pelo método “tea bag” (adaptado).



Fonte: A autora, adaptado de Viel, Collet e Lanos (2018).

Para calcular a taxa de absorção de água, utilizou-se a seguinte equação:

$$m_{h_2O} = \frac{m_3 - m_2 - m_1}{m_1} \times 100$$

Onde:

m_{h_2O} = absorção de água, em (%);

m_3 = Massa do sachê com casca de café, molhados no tempo t , em (g);

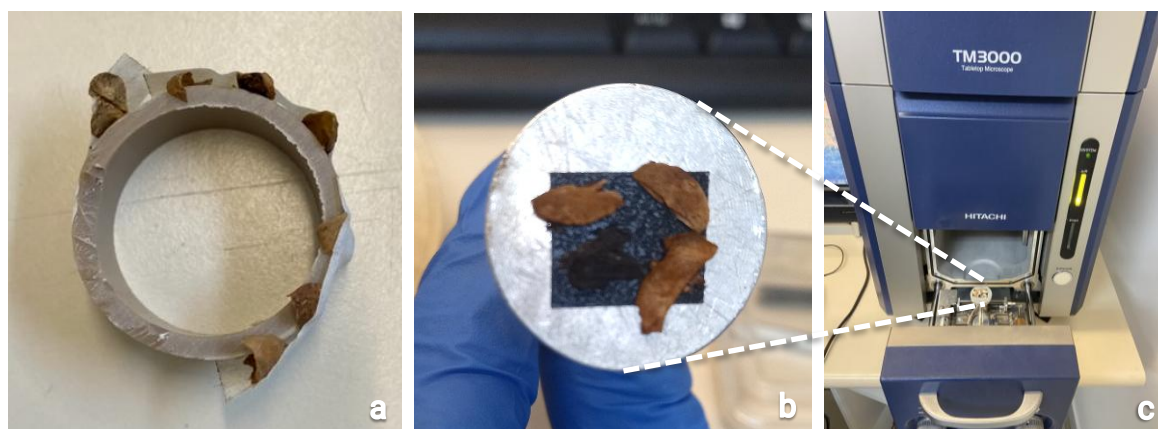
m_2 = Massa do sachê vazio molhado, em (g);

m_1 = Massa do bioagregado (casca de café) seco, em (g).

4.3.2. Caracterização microestrutural (MEV)

A microestrutura das seções transversal e horizontal das cascas de café foi examinada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em um equipamento TM 3000, disponível no Laboratório de Técnicas Analíticas do LabEST/COPPE/UFRJ (Figura 24c). Para facilitar a análise da seção transversal, as amostras foram fixadas em um suporte circular de PVC (de 3cm de altura), demonstrada na Figura 24a, e posteriormente, para análise da seção horizontal, foram fixadas no suporte do MEV com o auxílio de uma fita de carbono (Figura 24b).

Figura 24 – Preparação das cascas de café para análise no MEV.



Fonte: A autora.

4.3.3. Caracterização química

Todos os ensaios relativos à caracterização química das cascas de café foram desenvolvidos no Centro de Pesquisas e Caracterização de Petróleo e Combustíveis (COPPEComb) do Programa de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) seguindo o método desenvolvido por Abreu *et al.* (2006).

Preparação do material

As cascas de café foram processadas utilizando um moinho de facas (modelo LP 1003, da Primotécnica). Posteriormente, o material foi submetido à análise granulométrica por meio de um agitador de peneiras (Figura 25), com o objetivo de separar a fração F40/60, correspondente à parcela da biomassa com diâmetro inferior a 425 μ m e superior a 250 μ m.

Ressalta-se que todas as análises químicas quantitativas foram realizadas em triplicata, e os resultados foram expressos como a média aritmética dos três valores obtidos.

Figura 25 – Cascas de café no moinho de facas.



Fonte: A autora.

Determinação do Teor de extrativos

Para a determinação do teor de extrativos, foram depositadas 10g de casca de café em sachês de papel filtro, que foram armazenadas em um equipamento extrator do tipo Soxlhert (Figura 26a).

Figura 26– Processo para determinação de extrativos, utilizando equipamento extrator do tipo Soxlhert com ciclohexano (a), e posterior filtragem (b).



Fonte: A autora.

Para a determinação do teor de extrativos, foram pesadas 10g de casca de café e colocadas em sachês de papel filtro, sendo submetidas à extração em equipamento

do tipo Soxhlet (Figura 26a). O processo extrativo foi realizado sequencialmente com 400 ml de diferentes soluções: ciclohexano (C₆H₁₂), acetato de etila (C₄H₈O₂) e metanol (CH₄O). O sistema ficou sob refluxo por 12 horas. Na sequência, o solvente foi filtrado em uma membrana Millipore (Figura 26b). A etapa seguinte seria colocar o material no rotavapor com banho-maria a temperatura de 70 ± 2 °C, no entanto, esta etapa não foi concluída devido a problemas técnicos com o equipamento.

Para calcular o teor de extrativos, foi utilizado a equação:

$$S = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \times 100$$

Onde:

S - Teor de extrativos, em (%);

m₁ - Massa de amostra seca antes da extração em água e álcool, em (g);

m₂ - Massa de amostra seca após a extração, em (g).

Determinação do Teor de Lignina

A determinação do teor de lignina foi realizada em amostras de casca de café isentas de extrativos. O isolamento da lignina foi efetuado por meio do tratamento com ácido sulfúrico (H₂SO₄) a 72%, utilizando-se 0,3 g de casca processada, os quais foram transferidos para um frasco de Erlenmeyer com tampa.

Sob agitação magnética, 3 ml de ácido sulfúrico 72% (H₂SO₄) foram lentamente adicionados ao Erlenmeyer, o qual foi tampado e mantido sob agitação magnética por um minuto e conservado à temperatura ambiente por uma hora. Após esse tempo, a solução foi diluída com aproximadamente 84 ml de água destilada e submetida a refluxo por quatro horas. O resíduo foi pesado e depois lavado com 500 ml de água destilada quente e filtrado em membrana Millipore.

Por fim, o resíduo retido na membrana foi colocado em estufa a 100 ± 5°C até atingir massa constante, condição na qual o teor de lignina foi determinado. O conteúdo de lignina insolúvel foi determinado pela equação:

$$Li = \frac{mr}{ma} \times 100$$

Onde:

Li - Teor de lignina da amostra, em (%);

mr - Massa inicial de resíduo (g);

ma - Massa seca da amostra (g).

Os resultados foram apresentados no item 4.5.1 adiante.

4.4. Desenvolvimento da lâ isolante de micélio

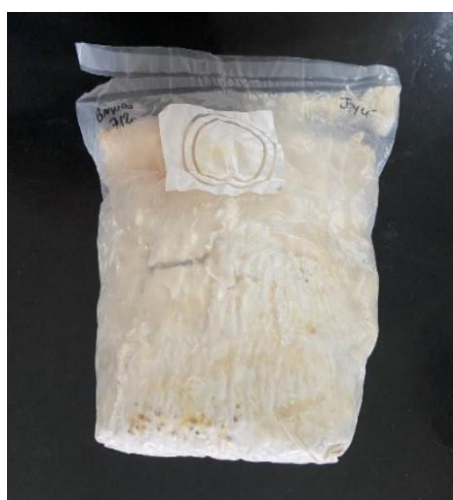
A produção da lâ isolante de micélio aconteceu no Laboratório de Microbiologia do Petróleo, da Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), no Centro de Tecnologia, Rio de Janeiro, Brasil.

O método de produção dividiu-se em quatro principais fases: (1) a inoculação do fungo; (2) a preparação dos resíduos em laboratório, utilizando formas de alumínio e vidro de Becker; (3) a colonização do material já inoculado; (4) desidratação para neutralizar o crescimento fúngico.

Apesar de várias pesquisas incluírem a Fase 1 em seus experimentos, neste estudo foi necessário a utilização de sementes já inoculadas, da empresa Fungicultura, que atua na comercialização e produção de cogumelos desde 2015, garantindo uma produção livre de contaminação. Essa escolha foi feita devido ao tempo necessário para realizar a Fase 1, e principalmente, pelo alto risco de contaminação.

Assim, o processo da fase 1 durou cerca de 20 dias, incluindo a produção e envio das sementes pela empresa Fungicultura. Durante esse tempo, deu-se início a obtenção do resíduo (cascas de café). Após a chegada das sementes, em um saco de polipropileno (Figura 27), foram armazenadas em um refrigerador, com temperatura entre 5° e 8°C.

Figura 27 – Sementes da espécie *Pleurotus ostreatus* em saco de polipropileno.



Fonte: A autora.

A Fase 2 foi iniciada antes de ir para o laboratório. As cascas de café foram aparadas manualmente com uma tesoura, de modo que ficassem entre 10 e 20 mm. Lingam *et al.* (2023) recomendam essa dimensão para facilitar a mistura e colocação nos moldes. Em seguida, as cascas foram fervidas a aproximadamente 100°C por uma hora (Figura 28). De acordo com Silva *et al.* (2012) essa etapa é necessária para

reduzir contaminações que poderiam inibir o crescimento dos fungos. Após esse período, as cascas foram reservadas em um refratário esterilizado, deixado em repouso sob temperatura ambiente.

Figura 28 – Processo de fervura das cascas de café.



Fonte: A autora.

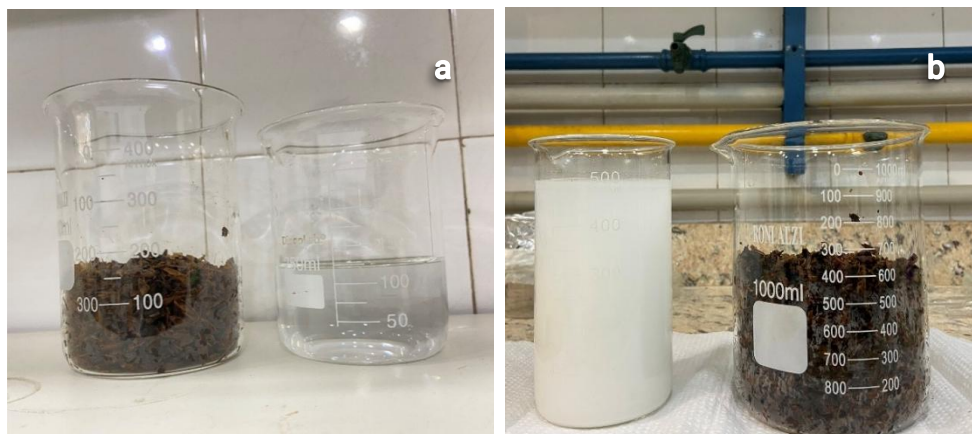
Em seguida, todos os materiais foram levados ao laboratório e deu-se início à preparação do resíduo. As amostras com casca de café foram separadas, a princípio foram colocadas em um vidro de Becker graduado para medição inicial, e depois foram distribuídas em três formas de alumínio de 10x10x10cm, sendo preenchidas até 2 cm de altura (espessura desejada).

Para os três corpos de prova (CP) adotou-se a proporção de: 150dm³ de casca de café (equivalente a 67g de casca de café úmida), 125mL de água destilada e 2g de carbonato de cálcio (CaCO₃), conforme Figura 29a.

Na Figura 29b, observa-se o carbonato de cálcio misturada com a água destilada. Esta mistura foi feita para adicionar nutrientes e melhorar o crescimento fúngico, ajudando na correção do pH² (Lingam *et al.*, 2023).

² Assim como na agricultura, o CaCO₃ foi utilizado para tentar minimizar a acidez do meio, sabendo que ele possui um pH mais alcalino. Segundo Drechsler-Santos (2015), a grande maioria dos fungos pode crescer em temperaturas que variam de 20°C a 30°C, possuindo um pH levemente ácido, perto de 6, diferentemente das bactérias (que preferem um meio mais alcalino).

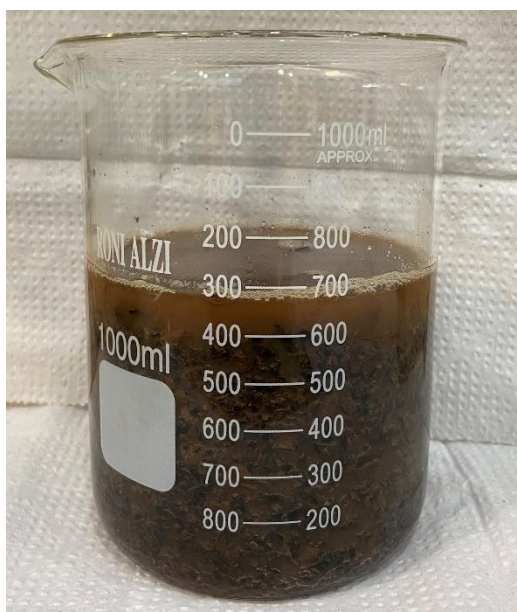
Figura 29 – Separação das quantidades de casca de café e água destilada (a) para uma amostra e posteriormente, para três amostras (b).



Fonte: A autora.

Depois disso, cada resíduo ficou embebido na mistura de água destilada e CaCO_3 , hidratando por aproximadamente uma hora (Figura 30).

Figura 30 – Amostra com casca de café durante o processo de hidratação.



Fonte: A autora

Após a hidratação, as amostras foram drenadas por meio de uma peneira e distribuídas igualmente em três formas de alumínio para serem levadas para a autoclave (Figura 25). Esse processo de esterilização mostrou-se fundamental durante o experimento, considerando que a primeira tentativa desenvolvida neste estudo ocorreu sem a realização desta etapa e houve contaminação das amostras no 12º dia.

Figura 31 – Autoclave e manômetro apontando para a temperatura utilizada na esterilização: 120°C.



Fonte: A autora

Dessa forma, as três amostras foram colocadas na autoclave por 30 minutos à 120°C, conforme indicado na Figura 31. Após esse tempo, as formas foram retiradas do equipamento e resfriadas naturalmente, em temperatura ambiente.

Depois, foi acrescentada a proporção de 10% das sementes inoculadas (em relação ao peso de cada amostra), como demonstrado na Figura 32a. Posteriormente, foram misturadas com o resíduo. A colonização foi feita próxima ao bico de Bunsen para não haver contaminação com o meio externo (Figura 32b).

Figura 32 – Sementes já incubadas com a espécie fúngica, sendo levadas para as formas (a), próximas ao bico de Bunsen (b), para não contaminarem com o meio externo.



Fonte: A autora.

Após a etapa de colonização, cada forma foi embalada com filme de PVC, com pequenas aberturas, que permitissem a troca de ar entre o meio e a cultura fúngica, permitindo seu crescimento (Lingam *et al.*, 2023).

Por fim, foram incubados, em uma estufa (Figura 33), com temperatura controlada a 28°C, sem exposição à luz solar, por 14 dias.

Figura 33 – Corpos de prova embalados dentro da estufa.



Fonte: A autora.

Após o período de 14 dias, o crescimento micelial mostrou-se promissor, conforme indicado na Figura 34, apresentando a podridão branca característica da espécie.

Figura 34 – Amostra (CP1) após 14 dias de crescimento.



Fonte: A autora.

A última fase consistiu na desidratação, em que a lã isolante de micélio, endurecida e com aspecto esbranquiçado, foi desidratada em uma estufa. De acordo com Bagheriehnajjar, Yousefpour e Rahimnejad (2023), Zhang *et al.* (2023), Özdemir *et al.*

(2022), Răut *et al.* (2021) e Bruscato *et al.* (2019), a temperatura utilizada em seus estudos variou de 60°C a 80°C, com duração de 5 horas até 48 horas, a depender da aplicação e do resíduo utilizado.

Assim, as amostras foram levadas para a estufa de convecção para desidratarem e neutralizarem o crescimento fúngico, e ficaram na estufa à 70°C por 24h, conforme a faixa indicada na literatura.

Por fim, passado a etapa de desidratação, os corpos de prova foram desmoldados e apresentaram-se como uma placa ou lã isolante de micélio solidificada, com uma textura superior mais aveludada, com uma maior concentração de pele fúngica (Figura 35a) e na parte inferior, uma maior compactação do resíduo, conforme indicado na Figura 35c.

Figura 35 – Resultado da amostra (CP1) desmoldada, indicando a pele fúngica mais espessa na parte superior (a), na lateral (b) e em menor quantidade na parte inferior (c).



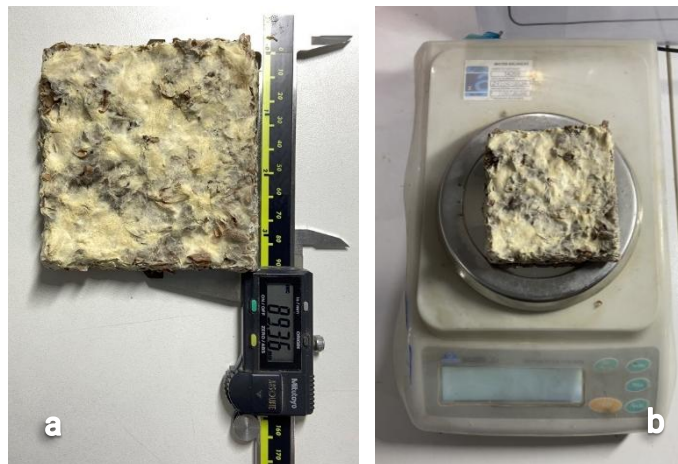
Fonte: A autora.

4.4.1. Propriedades físicas da lã isolante de micélio

Densidade

Os corpos de prova (CP) foram moldados em formas quadradas (de dimensões 10 x 10 x 2 cm). As dimensões finais (após a desidratação) dos CP é medida com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 36a) e em seguida as amostras foram pesadas em uma balança de precisão (de 0,001 g), como demonstrado na Figura 36b.

Figura 36 – Análise da densidade dos corpos de prova com (a) parquímetro e balança (b).



Fonte: A autora.

Assim, para calcular a densidade aparentes das amostras, considerou-se a seguinte equação:

$$Densidade (kg/m^3) = \frac{massa (kg)}{volume (m^3)}$$

Os resultados referentes à densidade aparente para cada fração volumétrica encontram-se detalhados no item 4.4 deste trabalho.

Condutividade térmica

A caracterização térmica da lã isolante de micélio e casca de café foi feita por determinação da condutividade térmica, medida no equipamento desenvolvido no NUMATS – POLI/COPPE/UFRJ (Figura 30). Esse equipamento é composto por uma caixa de dimensão 65 cm × 60cm × 45 cm (altura × largura × profundidade) contendo uma resistência com temperatura regulável e um termopar a meia altura (para controle da temperatura interna) conectado ao medidor de temperatura (Figura 37a). As paredes internas da caixa foram cobertas por mantas asfálticas para o isolamento térmico, conforme Figura 37b.

Figura 37 – Equipamento para análise de condutividade térmica.



Fonte: A autora.

Para o ensaio, foram analisados dois corpos de prova com a fixação de um termopar fixado no centro de cada face com dimensão aproximada de 10 cm × 10 cm para a condução do ensaio. Cada amostra foi posicionada com uma face virada para a parte interna da caixa, voltada para a resistência (Figura 38b) e isolada nas laterais com fita alumínio, visando perdas mínimas de calor para o ambiente externo (Figura 38a).

Figura 38 – Sensor posicionado simultaneamente na amostra pelo lado externo da caixa (a) e pelo lado interno (b).



Fonte: A autora.

O ensaio iniciou com um aquecimento da resistência durante 10 min para atingir a temperatura de 60°C, e seguiu para uma estabilização de temperatura a 60°C durante uma hora. Em seguida, a resistência foi desligada e a caixa resfriada.

A condutividade térmica foi calculada a partir da equação de Wickstrom (2016):

$$k = \frac{L \cdot h (T_1 - T_g)}{(T_2 - T_1)}$$

Onde:

k – Condutividade.

L – Espessura do material;

h – Coeficiente de transferência, igual a 18W/(m² K);

Tg – Temperatura da resistência;

T1 – Temperatura face aquecida no tempo selecionado;

T2 – Temperatura face oposta no tempo selecionado.

Esses valores foram coletados a partir da curva de gradiente térmico onde $(T_2 - T_1)$ foi considerado uma constante.

4.4.2. Propriedades Microestruturais da lã isolante de micélio

Foi utilizado uma pequena amostra (Figura 39) com faces irregulares, quebrada manualmente, extraída da região periférica de um dos corpos de prova originais (de 10 x 10 x 2 cm). O fragmento foi então fixado no suporte do MEV com o auxílio de uma fita de carbono. Para obtenção das imagens de MEV foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca HITACHI-TM 3000, do Laboratório de Técnicas Analíticas do LabEST/COPPE/UFRJ.

Figura 39 – Amostra de face irregular que foi extraída de um dos CP.



Fonte: A autora.

4.5. Resultados e Discussão

Nesta seção foram apresentados os resultados da caracterização das cascas de café e os resultados dos ensaios realizados com a lã isolante de micélio para determinação de suas propriedades físicas e a discussão com a literatura revisada anteriormente.

4.5.1. Caracterização da casca de café

Massa específica, Teor de Umidade e Absorção de água

A massa específica aparente das cascas de café apresentou uma média no valor de 400 kg/m³ (considerando a média aritmética entre três amostras) sendo, portanto, classificadas como leves. Considerando que os estudos de Rendeiro e Nogueira (2008) apresentaram valores de massa específica em torno de 200 e 373 kg/m³, e Saenger *et al.* (2001) em torno de 184 e 301 kg/m³, verificou-se que o valor encontrado é coerente. Já o teor de umidade de 15,64% ficou um pouco acima do esperado, pois segundo Saenger *et al.* (2001) os valores encontrados foram mais baixos, em torno de 10 a 11%.

Assim, seguindo o mesmo protocolo de Tinoco *et al.* (2023), que seguiu as recomendações da RILEM 236-BBM, a absorção de água das partículas vegetais pode ser descrita por uma lei logarítmica, representada pela equação:

$$W_{(t)} = C_A \cdot \log(t) + W_0$$

Onde:

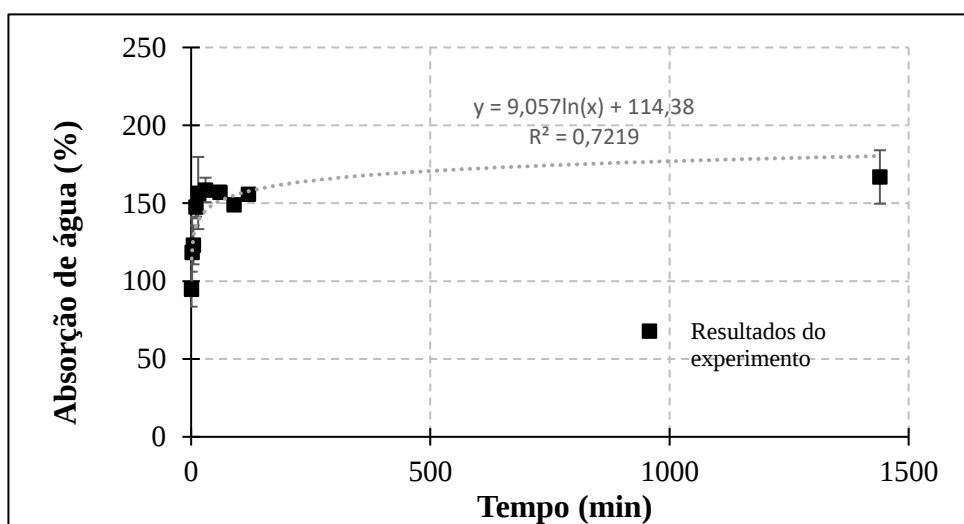
$W_{(t)}$ = absorção de água em um tempo t , em (%);

C_A = Coeficiente de absorção de água;

W_0 = Absorção inicial da água na superfície dos granulados.

A partir da análise dos resultados, a absorção de água inicial da casca (W_0) da casca de café foi de 94,76%, e o coeficiente de absorção de água (C_A) foi de 9,057. A absorção máxima (indicado pelo último quadradinho da Figura 40) foi de 166,82%, que se encontra dentro do limiar da linha logarítmica apresentada.

Figura 40 – Resultado da absorção de água da casca de café, utilizando o método “tea bag”.



Fonte: A autora.

Em geral, a absorção é influenciada pelo tamanho e área superficial das partículas. É por isso que ela segue uma lei logarítmica, pois as partículas tornam-se saturadas da mais finas para as mais grossas (Tinoco *et al.*, 2023).

Assim, os valores de massa específica aparente (γ_a), teor de umidade (U), absorção de água inicial (W_0) e final (W_{max}) convergem com os valores encontrados na literatura, sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores médios de massa específica aparente (γ_a), teor de umidade (U), absorção de água inicial (W_0) e final (W_{max}) da casca de café.

γ_a (kg/m³)	U (%)	W_0 (%)	W_{max} (%)
400	15,64	94,76	166,82

Fonte: A autora.

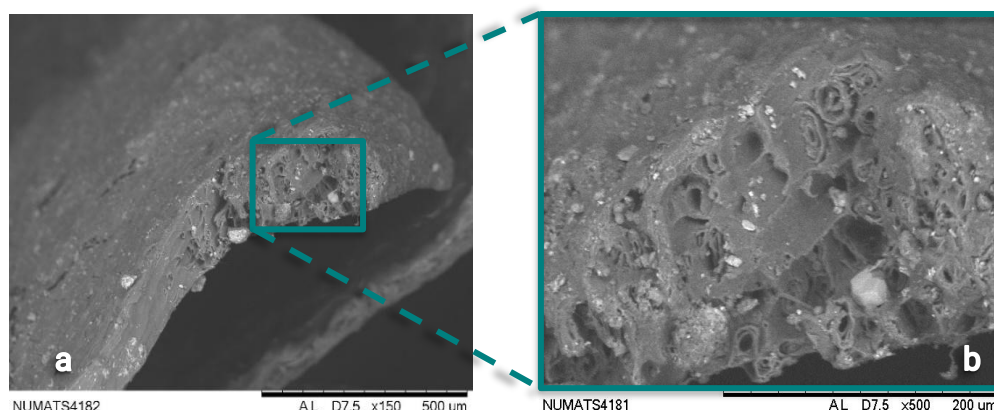
Caracterização microestrutural das cascas de café

As figuras 41 e 42 demonstram os resultados obtidos pela Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV) da casca de café, na seção transversal e horizontal, respectivamente.

Percebeu-se que diferente de outros bioagregados, como o bambu (Paiva *et al.*, 2021) e a casca de arroz (Tinoco *et al.*, 2023), a casca de café possui mais ranhuras na parte horizontal da sua superfície (Figura 41a). No entanto, foi possível observar que as bordas da casca apresentaram uma estrutura mais porosa (Figura 41b). Essas cavidades ocas, preenchidas de ar, são responsáveis pela leveza do agregado, e

consequentemente pelos baixos valores de massa específica aparente e pelo seu potencial higroscópico.

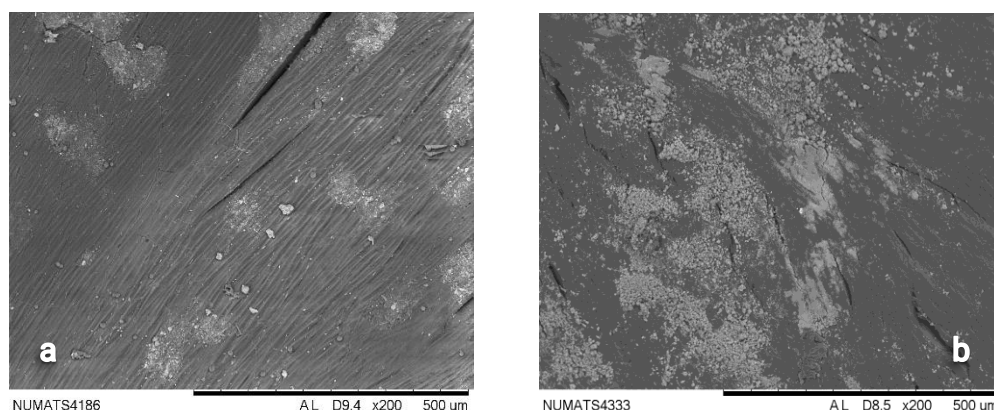
Figura 41 – Microscopia de varredura eletrônica da casca de café na seção transversal, com zoom de 150x (a) e 500x (b).



Fonte: A autora.

Além disso, foram analisadas as amostras da casca de café antes do tratamento, ou seja, *in natura*, e pós-tratamento (após a fervura a 100°C e adição de CaCO_3). Observou-se que as cascas *in natura* (Figura 42a) apresentaram uma estrutura superficial mais rígida com a presença de algumas ranhuras ocasionais. Já nas amostras tratadas (Figura 42b) houve um aumento do número de ranhuras na superfície horizontal (e não na transversal), além de um aumento da quantidade de resíduos (pontos pequenos brancos na imagem), que segundo Almeida *et al.* (2023), pode ter ocorrido por conta de uma precipitação de lignina, dado que houve um tratamento alcalino. Outra possibilidade é de que essas partículas sejam ainda o resíduo do CaCO_3 utilizado no pós-tratamento (durante o processo de hidratação).

Figura 42 – Microscopia de varredura eletrônica da casca de café antes (a) e após tratamento (b), ambas com zoom de 200x.



Fonte: A autora.

Caracterização química das cascas de café

Devido a inoperabilidade do equipamento, foi obtido apenas os valores referentes ao teor de lignina e de extrativos. Na Tabela 4 foram apresentados os resultados médios obtidos para a composição química das cascas de café:

Tabela 4 – Resultado da média de valores da composição química parcial das cascas de café.

Lignina (%)	Extrativos (%)
44,82%	1,51%

Fonte: A autora.

Resultados de um estudo prévio, de Almeida *et al.* (2023), com casca de café da espécie *Coffea Arabica*, revelaram valores de 42% para lignina, 18% para celulose e 15% para hemicelulose. Em sua revisão, citaram outros autores, que obtiveram valores médios de 24,2% para lignina, 32,5% para celulose e 18% de hemicelulose, sendo o restante atribuído ao teor de cinzas.

Constatou-se, portanto, uma divergência entre os dados da literatura. No entanto, semelhante ao ocorrido nos resultados de Almeida *et al.* (2023), o teor de lignina desta presente pesquisa ultrapassou a média reportada na literatura. Esta diferença pode ser justificada devido à variedade da cultura, às condições de crescimento e ao método de processamento escolhido.

Estudos como os de Barta *et al.* (2024) demonstram que resíduos com alto teor de celulose favorecem o rápido crescimento fúngico e impactam positivamente na resistência à tração dos blocos de micélio. Zhang *et al.* (2023) reiteram que teores elevados de lignina podem prejudicar a resistência à tração, além de aumentar o tempo de crescimento fúngico.

No entanto, considerando que o ensaio de composição química não forneceu dados relativos aos teores de celulose e hemicelulose, torna-se imprescindível a realização de ensaios complementares, visando corroborar os resultados obtidos e determinar, com maior precisão, a influência da casca de café nas propriedades mecânicas do material. Para futuras pesquisas, levantou-se a hipótese de que a otimização da composição do resíduo, com foco em melhorar a relação entre celulose e lignina, pode ser uma estratégia para aprimorar o desempenho do material.

4.5.2. Caracterização da lã isolante de micélio

Densidade aparente

Os resultados encontrados para densidade aparente do material para cada fração volumétrica encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos índices de densidade aparente em kg/m³.

Corpos de prova	Densidade aparente (kg/m ³)
CP 1 (casca de café)	303,58 kg/m ³
CP 2 (casca de café)	213,41 kg/m ³
CP 3 (casca de café)	217,20 kg/m ³
CP 4 (casca de café)	217,44 kg/m ³

Fonte: A autora

Após fazer a média das quatro amostras com casca de café (CP1 a CP4) encontrou-se uma média de 237,91 kg/m³, com desvio de padrão de 1%. Esse valor encontra-se em conformidade com o estudo de Alemu, Tafesse e Deressa (2022) que encontraram um valor médio de 292,35kg/m³ para suas amostras com casca de café.

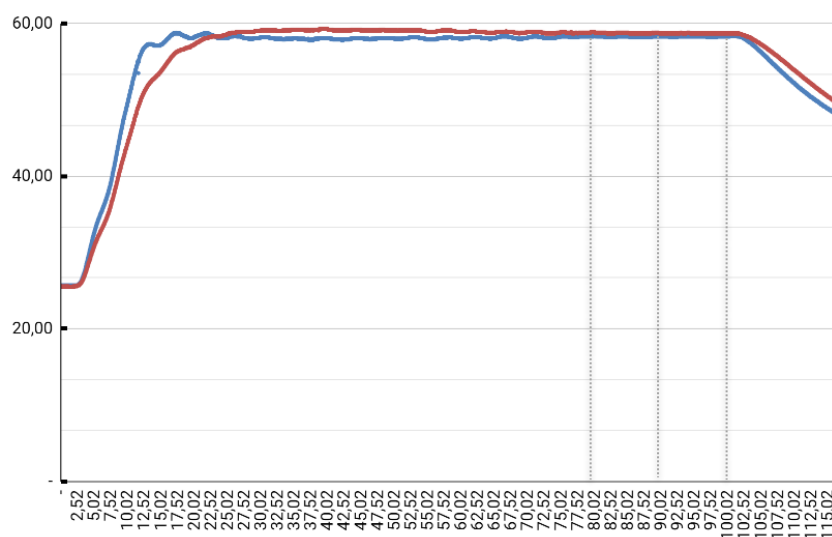
Quando comparado com outros isolantes renováveis, a lã de rocha apresentou resultados semelhantes, com uma variação de 20 a 200 kg/m³ (ABNT NBR 15220). Já o cânhamo obteve valores mais baixos, variando de 38 a 41 kg/m³ (Al-Qahtani, Koç e Isaifan, 2023).

Dessa forma, o material se encontra dentro da faixa indicada na literatura para isolantes ecológicos e, de maneira geral, por conta da sua baixa densidade, são inadequados para qualquer uso estrutural. Por isso, reforça-se que sua aplicação mais adequada é para núcleos de porta, divisórias internas, paredes sanduíche e espumas (Jones *et al.* 2020).

Condutividade térmica

Os dados coletados geraram o gráfico ilustrado na Figura 43. Os tempos em que ambas as linhas (vermelha e azul) ficaram mais próximas, ou seja, o momento em que cada sensor (um na parte interna e outro na parte externa do CP) marcou a mesma temperatura foi em 80, 90 e 100 minutos (Figura 43). Ao utilizar esses tempos na fórmula de Wickstrom (2016) obtivemos o valor de condutividade térmica de 0,04 W/m·K, 0,07 W/m·K e 0,07 W/m·K respectivamente.

Figura 43 – Relação entre a temperatura e os tempos marcados durante o ensaio.



Fonte: A autora.

No entanto, só foi possível realizar o teste com uma única amostra (CP 1) devido a geometria do material. A caixa onde o ensaio foi realizado foi construída para análises com bioconcretos de formato 10 x 10 cm, porém, mesmo a placa (lã isolante) de micélio tendo sido modelada em formas de mesmo tamanho, durante o processo de desidratação e desmoldagem, as amostras reduziram de tamanho, dificultando o encaixe das peças dentro da caixa, o que permitiu o escape de ar, inviabilizando o resultado dos outros ensaios (com as amostras CP 2, CP 3 e CP 4). Além disso, por ser um material muito frágil, houve certa dificuldade na colocação dos sensores durante a medição, o que também pode ter contribuído com erros de leitura do termostato.

Assim, para validar os valores encontrados no ensaio realizado (a partir da amostra CP 1), utilizou-se a fórmula de Lagouin *et al.* (2019). Em seu estudo, estabeleceram uma relação entre o aumento da condutividade térmica (λ) e o aumento da densidade (ρ) do concreto de cânhamo. Esta equação pode ser generalizada para concretos vegetais: $\lambda=0,0002\rho+0,0194$. Os valores obtidos a partir desta equação foram apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados de densidade aparente e condutividade térmica das amostras.

Dados dos CP	Casca de café					
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média (W/m·K)	Desvio Padrão
Largura (cm)	86	92	89,36	83,09	87,61	3,89
Comprimento (cm)	91,00	91,00	81,23	84,65	86,97	4,86
Espessura (cm)	12,00	15,00	16,06	15,98	14,76	1,90
Massa estabilizada (g)	28,51	26,8	25,32	24,44	26,27	1,78
Volume (cm ³)	93,91	125,58	116,57	112,40	112,12	13,32
Densidade (kg/m ³)	303,58	213,41	217,20	217,44	237,91	43,82
Condutividade (W/(m·K))	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07	0,01

Fonte: A autora.

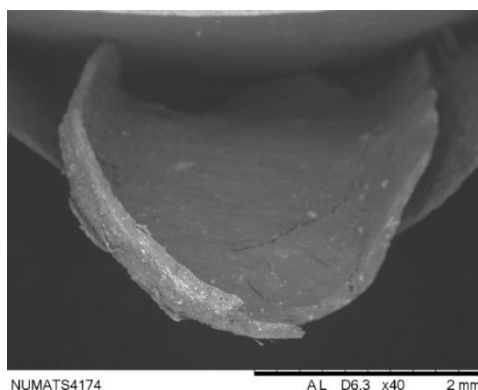
Diante disso, tendo sido encontrado um valor médio de condutividade muito similar aos valores coletados pelo ensaio, pode-se adotar que o valor médio de condutividade térmica da lã isolante de micélio foi de 0,07 W/m·K.

Em comparação com outros isolantes, observam-se valores médios de 0,035 W/m·K para a lã de rocha, 0,05 W/m·K para o cânhamo e 0,035 W/m·K para o EPS (Al-Qahtani, Koç e Isaifan, 2023), ou seja, embora o micélio apresente valores superiores, de acordo com Grenon, Maref e Ouellet-Plamondon (2023), a norma francesa RT 2012 classifica os materiais isolantes como aqueles que possuem valor de condutividade inferior a 0,09 W/m·K, Dessa forma, o valor médio de condutividade térmica obtido no ensaio encontra-se em conformidade com o padrão estabelecido.

Análises microestruturais

As características morfológicas das amostras obtidas neste estudo, tanto na estrutura transversal quanto na superficial, foram examinadas e comparadas com a matéria-prima (casca de café). Percebeu-se que as partículas da casca de café apareceram mais lisas originalmente (Figura 44).

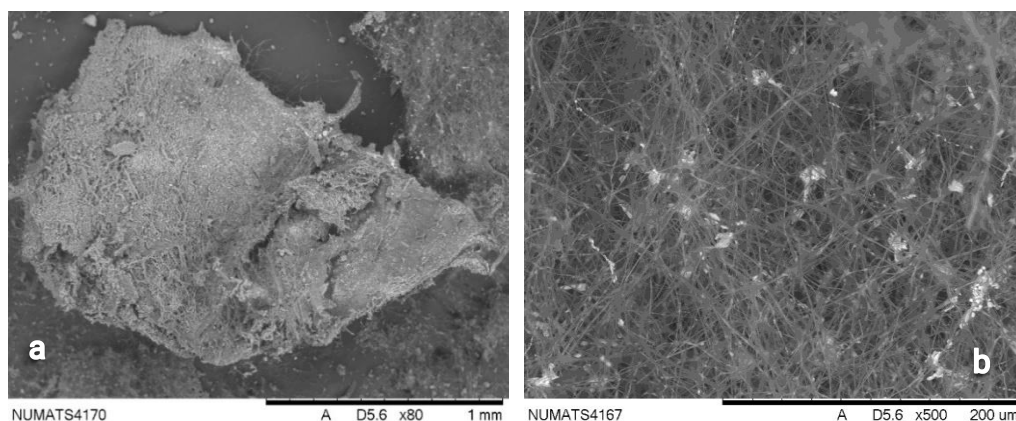
Figura 44 – Análise morfológica da casca de café, com zoom de 40x.



Fonte: A autora.

Após a colonização, uma rede micelial fúngica cobriu grande parte da superfície previamente lisa (Figura 45a). Analisando as imagens, observou-se que as hifas fúngicas fundiram as partículas de casca de café formando uma rede micelial, expondo os vazios de ar dentro do compósito (Figura 45b). Essas características morfológicas se alinham com o estudo de Hotz *et al.* (2023), que demonstraram que a superfície dos resíduos utilizados também foi coberta por uma rede fibrosa de hifas fúngicas após a colonização do micélio. Barta *et al.* (2024) complementaram que esse crescimento apical das pontas das hifas, ocorrem por meio de ramificações, que resultam em um padrão de crescimento exponencial do micélio, especialmente nos estágios iniciais da fase vegetativa. Esse padrão de crescimento das hifas é o que capacita os fungos filamentosos a aglutinarem os resíduos lignocelulósicos, como pode ser demonstrado nas imagens.

Figura 45 – Análise morfológica da placa (lã isolante) de micélio com zoom de 80x (a) e 500x (b).



Fonte: A autora.

A compreensão das características do bioagregado e da lã isolante de micélio, desde a microescala até a macro escala, é fundamental para determinar seu comportamento mecânico, físico e térmico. Conforme demonstrado, a relação entre os teores de lignina e celulose podem influenciar no desempenho do material. Adicionalmente, a escolha de outros resíduos pode afetar as propriedades térmicas do material, sabendo que bioagregados mais finos, possuem menor quantidade de cavidades de ar (Livne *et al.*, 2024), e consequentemente, tendem a apresentar valores mais elevados de densidade e condutividade térmica.

Por fim, em função das limitações temporais inerentes ao desenvolvimento desta pesquisa e por já ter o conhecimento prévio (apontado na literatura) de que o micélio é mais indicado para isolamento térmico, optou-se por priorizar os ensaios de propriedades físicas e térmicas, em detrimento aos de resistência mecânica. Isso também se justifica porque os valores referentes à densidade e condutividade térmica (e calor específico) serviram de dados de entrada para as simulações desenvolvidas posteriormente.

CAPÍTULO 5

Simulação computacional termoenergética

5.1. Contextualização e Objetivo

A concepção de um projeto arquitetônico exige um entendimento abrangente de diversos aspectos, sejam eles estéticos, funcionais, culturais e climáticos. Nesse tocante, é fundamental considerar aspectos como a orientação das fachadas, a volumetria do edifício, o tamanho e a posição das aberturas, e a escolha dos materiais que serão utilizados na edificação, especialmente nos sistemas de vedação vertical e horizontal, que compõe a envoltória de uma edificação (Almeida, Silvosso e Brasileiro, 2020).

A especificação adequada desses materiais, contribui consideravelmente para o conforto térmico e a eficiência energética do edifício, sabendo que esses materiais desempenham um papel crucial na regulação da temperatura interna da edificação, atuando como um agente conector, responsável pelas trocas térmicas entre o meio externo e interno (Lamberts, Dutra e Pereira, 2014).

As simulações energéticas têm surgido como método de avaliação do desempenho termoenergético e das emissões de CO₂ das edificações considerando as propriedades físicas, geométricas e térmicas de seus materiais (componentes). Por meio dessas análises é possível testar diferentes estratégias de projeto e prever soluções mais eficientes, com um menor impacto ambiental, considerando todo o ciclo de vida da edificação (Araujo, 2023). Dessa maneira, as simulações ajudam nas tomadas de decisão, especialmente nas fases iniciais projetuais, o que permite uma previsão dos desafios que serão encontrados e a busca por diferentes soluções. Franco (2023) reitera que uma das principais funções da avaliação do desempenho termoenergético é quantificar o consumo de energia térmica de um edifício, com o objetivo de compreender e identificar possíveis áreas de melhoria, antes da construção do edifício.

Assim, para avaliar o comportamento de novos materiais, como é o caso do micélio, ponto chave desta pesquisa, é essencial que essa avaliação seja realizada.

Dessa forma, diante do exposto, este capítulo se propôs a avaliar o desempenho termoenergético do micélio como material de isolamento térmico em sistemas de vedações verticais e horizontais, para, posteriormente, discutir seu comportamento aplicado em duas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras: a zona 1, tendo como representante a cidade de Curitiba, e a zona 8, na cidade de Fortaleza.

5.2. Método e sistemas avaliados

Para a realização das simulações, foi escolhido o software DesignBuilder³, devido a funcionalidade do programa possibilitar uma abordagem paramétrica mais rigorosa, permitindo a modificação simultânea de múltiplos parâmetros que resultam em um maior número de combinações capazes de fornecer uma análise de sensibilidade e quantificação de incertezas mais robusta (Pereira *et al.*, 2021). Embora utilize a máquina de cálculo do *Energy Plus* (um software mais complexo) como motor da simulação, o *DesignBuilder* possui uma interface mais intuitiva, permitindo a criação de modelos de forma mais simples, rápida e eficiente (Cichowicz, 2017).

Em resumo, este programa permite o desenvolvimento de modelos construtivos por meio da (i) caracterização dos sistemas energéticos utilizados, (ii) da determinação dos consumos energéticos de climatização e/ou aquecimento (considerando a informação climática e horária), e (iii) na verificação das estratégias de otimização energética propostas (DesignBuilder, 2021), sendo o software mais aceitável para estudar a iluminação, as emissões de CO₂ e o conforto térmico de uma edificação (Pawar e Kanade, 2018).

Para isso, a modelagem requer a inserção de um conjunto de dados, como: localização e orientação, dados climáticos, geometria e propriedades dos materiais, ocupação (quantidade de pessoas), configurações de iluminação, ventilação natural, sistema de condicionamento de ar e demais equipamentos (Caldas, 2020).

Neste estudo foram considerados os sistemas de vedação vertical e horizontal da envoltória de uma edificação de escritórios, detalhados posteriormente. O programa permitiu a criação de composições de materiais para cada sistema construtivo, ou seja, combinar camadas de diversos materiais, como uma parede com um núcleo e suas espessuras correspondentes. Inicialmente, foram adotados 4 cenários com variações na composição de alguns sistemas, detalhados na Tabela 7.

O cenário 1 não possui micélio em nenhum de seus sistemas; o cenário 2 possui apenas na parte de isolamento das paredes externas e internas (vedação vertical); o cenário 3 possui apenas no forro; e o cenário 4 possui nas paredes externas e internas, e no forro.

³ Uma ferramenta validada pela ASHARAE (*Standard Method of Test for Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*), recomendada pela ABNT NBR 15575:2021 e os regulamentos do PBE-Edifica (Franco, 2023).

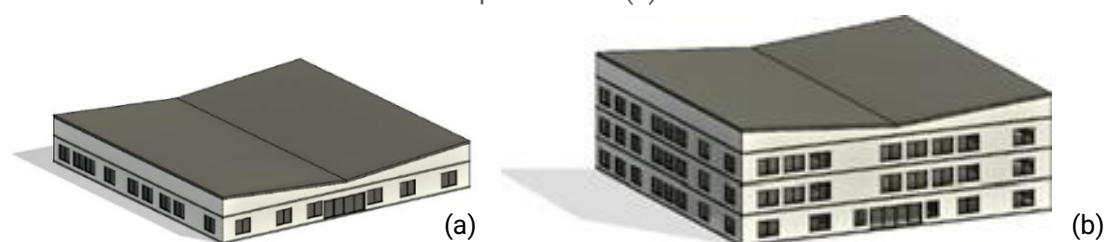
Tabela 7 – Detalhes da composição dos cenários dos sistemas avaliados.

Cenários	Composição geral		
	Cobertura	Piso	Vedação vertical
01	Telha de fibrocimento + laje de concreto + forro de gesso	Laje de concreto + porcelanato	Parede de concreto (bloco de concreto + argamassa)
02	Telha de fibrocimento + laje de concreto + forro de gesso	Laje de concreto + porcelanato	Parede de concreto (bloco de concreto + argamassa + lã isolante de micélio)
03	Telha de fibrocimento + laje de concreto + forro de gesso com lã isolante de micélio	Laje de concreto + porcelanato	Parede de concreto
04	Telha de fibrocimento + laje de concreto + forro de gesso com lã isolante de micélio	Laje de concreto + porcelanato	Parede de concreto (bloco de concreto + argamassa + lã isolante de micélio)

Fonte: A autora.

Esses cenários foram testados em dois projetos de uma edificação de escritórios: a primeira com um único pavimento e a segunda com três pavimentos, ilustrados pelas Figura 46a e Figura 46b respectivamente. A modelagem e o detalhamento do fluxo de trabalho deste projeto foram especificados na pesquisa de Franco (2023), e utilizados como referência para a presente pesquisa.

Figura 46 – Perspectivas das edificações de escritórios modeladas com um pavimento térreo (a) e três pavimentos (b).



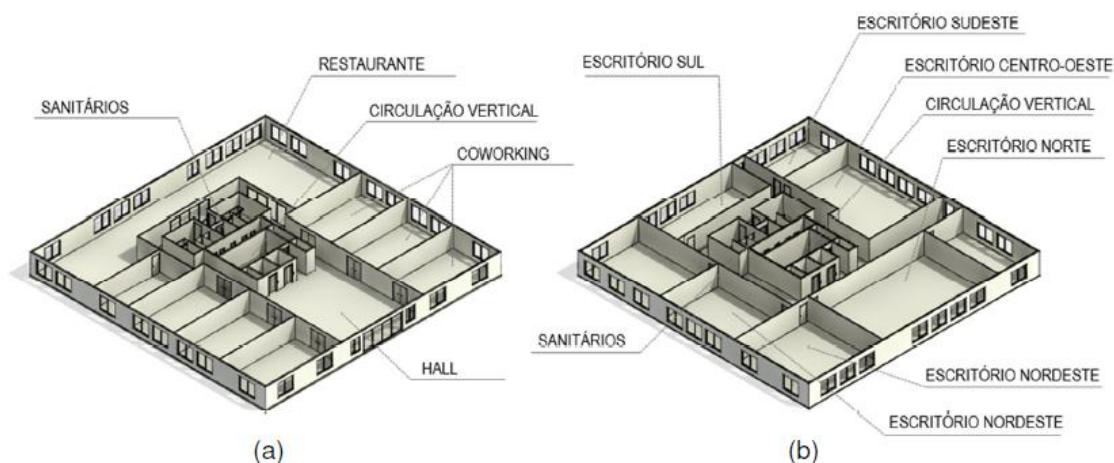
Fonte: Franco (2023) adaptado pela autora.

Nesse sentido, adotou-se o mesmo modelo com algumas adaptações. Segundo o passo-a-passo de Franco (2023), após a importação do modelo para o *DesignBuilder*, foi adicionado ao software: as propriedades térmicas dos materiais (detalhadas na Tabela 8), os dados climáticos; configurações do sistema de iluminação; ocupação dos usuários; quantidade de equipamentos; e sistema de climatização.

A escolha de uma edificação de uso corporativo justifica-se pela natureza não residencial deste tipo de construção, em que o isolamento térmico pode ser considerado não essencial. Adicionalmente, um edifício de escritórios demanda o uso prolongado de sistemas de resfriamento (ar-condicionado), o que evidencia a importância do isolamento térmico, bem como do isolamento acústico, que pode melhorar o conforto dos usuários.

A planta baixa do pavimento tipo foi adotada para os dois gabaritos da edificação, para o de um e três pavimentos, representadas pelas Figuras 47a e 47b. O projeto da edificação possui escritórios dispostos em todas as quatro fachadas e um núcleo composto por: elevadores, escadas, banheiros e corredores. A área total do pavimento tipo possui dimensões de 30 x 30 metros. Assim, as áreas brutas totais construídas são de 900m² (para um pavimento) e 2.700m² (para três pavimentos).

Figura 47 – Planta baixa do pavimento térreo (a) e do pavimento tipo (b).



Fonte: Franco (2023)

Na Tabela 8, destacou-se os dados referentes ao micélio (em laranja) obtidos por meio dos ensaios realizados no capítulo anterior, exceto pelo calor específico, cujo valor foi determinado a partir da média de dados encontrados na literatura consultada.

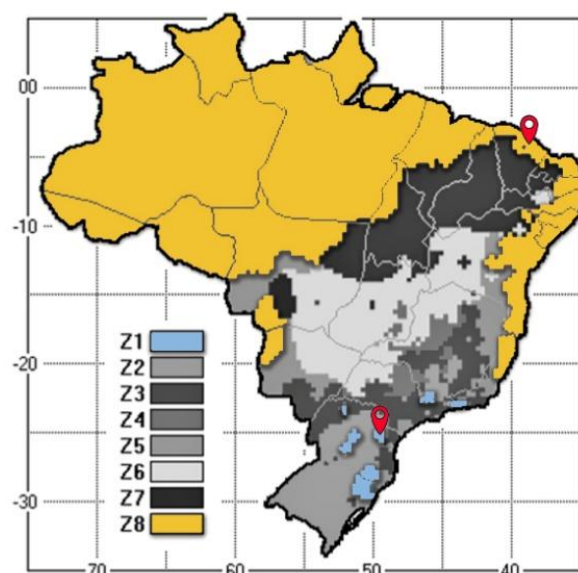
Estudos como os de Zhang *et al.* (2022), Girometta *et al.* (2019) e Xing *et al.* (2018) reportam valores de calor específico para o micélio entre 6,8 e 10,2 kJ/kg.K. Diante desta variação, adotou-se o valor médio de 8,5 kJ/kg.K para o material em questão.

Tabela 8 - Dados de entrada dos materiais para a simulação no DesignBuilder.

Materiais									
Sistema	Elemento	Material	Espessura [m]	λ - Condutividade térmica [W/(m.K)]	μ - Massa específica [kg/m³]	c - Calor específico [kJ/(kg.K)]	α - Absortância solar	Emissividade	Referência
Cobertura	Telha	Telha de fibrocimento	0,006	0,95	2000	0,84	0,84	0,9	ABNT NBR 15220-3 Silveira <i>et al.</i> , 2012
	Laje	Concreto	0,12	1,75	2300	1	-	-	ABNT NBR 15220-3
		Aço CA 50	-	55	7800	0,46	-	-	ABNT NBR 15220-3
	Forro	Perfil T em aço	-	-	0,7	-	-	-	Ficha técnica Divisystem
		Lã isolante de micélio	0,05	0,07	298	8,5	-	-	Zhang <i>et al.</i> , 2022, Girometta <i>et al.</i> , 2019 e Xing <i>et al.</i> , 2018
		Gesso	0,0125	0,35	875	0,84	-	-	ABNT NBR 15220-3
		Tinta branca	0,0001	-	1444	-	0,2	-	Suvinil; NBR 15220:2005
Piso	Laje	Concreto	0,12	1,75	2300	1	-	-	ABNT NBR 15220-3
		Aço CA 50	-	55	7800	0,46	-	-	ABNT NBR 15220-3
		Argamassa interna	0,05	1,15	1950	1	-	-	ABNT NBR 15220-3
	Revestimento	Porcelanato	0,01	0,8	1700	0,85	-	-	Banco de dados do DesignBuilder
Vedação vertical externa e interna	Parede de concreto	Tinta branca	0,0001	-	1444	-	0,2		Suvinil; NBR 15220:2005
		Argamassa externa	0,025	1,15	1950	1	-	-	ABNT NBR 15220-3
		Bloco de concreto	0,19	1,72	x	x	x	x	x
		Argamassa interna	0,025	1,15	1950	1	-	-	ABNT NBR 15220-3
	Isolamento	Lã isolante de micélio	0,05	0,07	298	8,5	-	-	Zhang <i>et al.</i> , 2022, Girometta <i>et al.</i> , 2019 e Xing <i>et al.</i> , 2018
	Porta	Madeira	0,04	1,19	700	2,39	-	-	Banco de dados do DesignBuilder
	Janela	Vidro simples	0,006	0,9	2500	0,84	0,155	0,84	Banco de dados do DesignBuilder
		Estrutura alumino	-	230	2700	0,88	0,05	0,05	ABNT NBR 15220-3

Além dos quatro cenários iniciais variando em duas tipologias (um pavimento e três pavimentos), foram estudadas duas Zonas Bioclimáticas (ZBs) brasileiras, elencadas em diferentes climas de acordo com a classificação internacional Köppen-Geiger, a fim de analisar o comportamento e a eficiência do micélio, quando aplicado em temperaturas mais frias e mais quentes. Dessa forma, foram simuladas as cidades de Curitiba (da ZB1, de clima temperado úmido com verão moderado, sem estação seca) e Fortaleza (da ZB8, de clima tropical, com estação seca de verão), indicadas na Figura 48.

Figura 48 – Mapa indicando as zonas bioclimáticas brasileiras com destaque para a ZB1 (em azul), ZB8 (em amarelo) e respectivas cidades.



Fonte: ABNT NBR 15.220-3 (ABNT, 2003), adaptado pela autora

Seguindo a mesma metodologia de Franco (2023), foi considerado: horário de funcionamento de segunda a sexta-feira de 7 às 19h; cargas internas de 0,1 pessoa/m²; e 15W/m² referentes à ocupação, equipamentos, e densidade de potência de iluminação de cada ambiente; para as zonas térmicas de uso permanente, um sistema de ventilação híbrido, com climatização artificial tipo *VRF* (*Variable Refrigerante Flow*) nível A; e temperatura de resfriamento definido em 24 °C.

Após a inserção de todas essas informações, foi possível avaliar os consumos anuais de eletricidade para equipamentos, resfriamento e iluminação para 16 cenários (considerando a variação de quatro composições, duas tipologias e dois dados climáticos diferentes). Os cenários foram detalhados na Tabela 9 e os resultados apresentados a seguir.

Tabela 9 – Descrição dos 16 tipos de combinação, considerando o número de pavimentos, cidade e variação dos cenários.

Número de pavimentos	Cidade	Código do cenário	Descrição
01	Fortaleza	C-01	Sem micélio
		C-02	Micélio apenas nas paredes externas e internas
		C-03	Micélio apenas no forro
		C-04	Micélio nas paredes externas, internas e no forro
	Curitiba	C-05	Sem micélio
		C-06	Micélio apenas nas paredes externas e internas
		C-07	Micélio apenas no forro
		C-08	Micélio nas paredes externas, internas e no forro
03	Fortaleza	C-09	Sem micélio
		C-10	Micélio apenas nas paredes externas e internas
		C-11	Micélio apenas no forro
		C-12	Micélio nas paredes externas, internas e no forro
	Curitiba	C-13	Sem micélio
		C-14	Micélio apenas nas paredes externas e internas
		C-15	Micélio apenas no forro
		C-16	Micélio nas paredes externas, internas e no forro

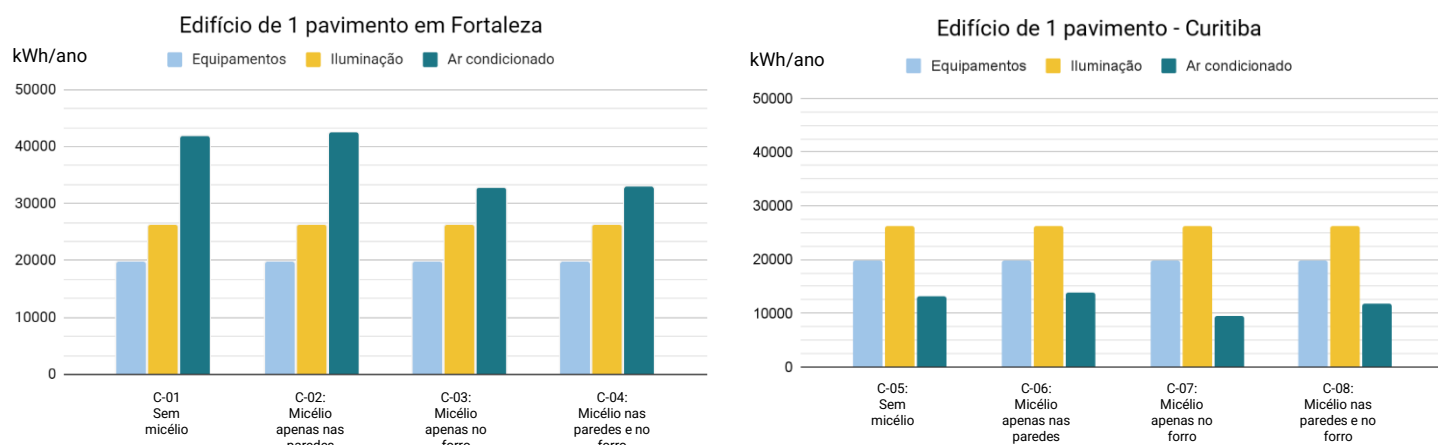
Fonte: A autora.

5.3. Resultados e Discussão

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos na simulação do estudo de caso apresentado, após análise de 16 tipos de combinações (Tabela 9).

Os resultados demonstraram o consumo energético ao longo de um ano de uso da edificação em kWh/ano. Assim, a Figura 49 exhibe os resultados para edificação de um pavimento, com 900 m², para Fortaleza e Curitiba, respectivamente.

Figura 49 – Consumo anual de eletricidade para edificação de 1 pavimento, considerando os gastos energéticos com ar-condicionado, iluminação e equipamentos nas cidades de Fortaleza e Curitiba.



Fonte: A autora.

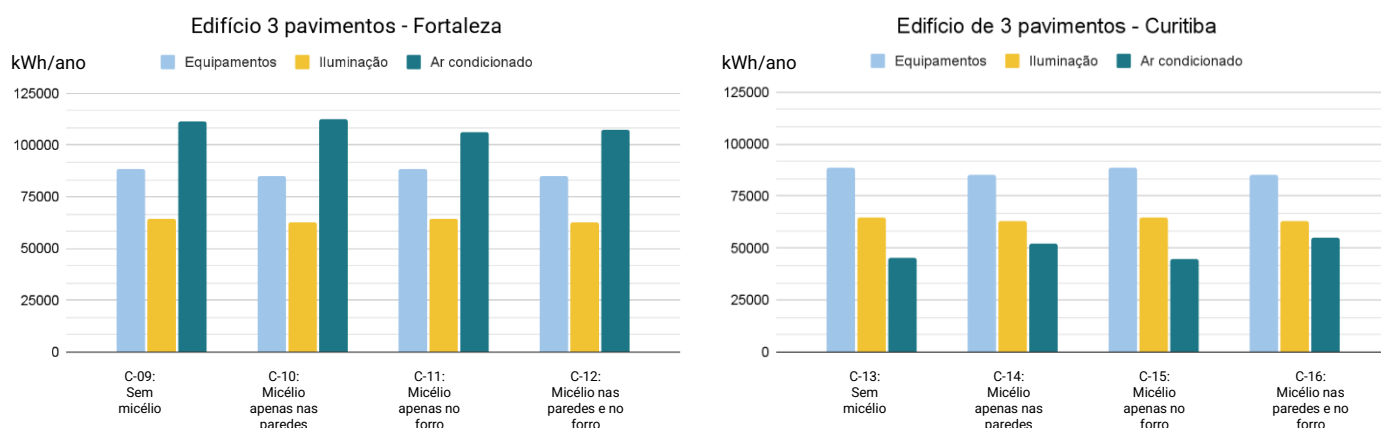
Os cenários C-01 e C-05 foram considerados os “pontos zero” das simulações, de forma que, os resultados dos outros cenários foram sendo comparados com eles. Dessa maneira, foi possível observar quais cenários (com micélio em sua composição) apresentaram uma maior economia energética anual.

Assim, os cenários C-01 e C-05 obtiveram um consumo constante para equipamentos de 19,7 kWh/ano e para iluminação de 26,2 kWh/ano. Já para refrigeração ocorreu uma variação de 41,8 kWh/ano em Fortaleza (C-01) e 13,2 kWh/ano em Curitiba (C-05). Somando-se as três colunas, os consumos totais de energia foram de 87,1 kWh/ano para Fortaleza (C-01) e de 59,2 kWh/ano para Curitiba (C-05), com uma diferença de 48,2% entre as cidades.

Percebeu-se que os consumos energéticos nos equipamentos e iluminação se mantiveram constantes para todos os casos, porque os parâmetros modelados não foram alterados de um cenário para o outro, nem entre cidades. Logo essa diferença entre Fortaleza e Curitiba se justifica unicamente pelo uso do ar-condicionado, o que era esperado, considerando que Fortaleza apresenta temperaturas mais altas, e por conta disso, o uso de resfriamento ao longo do ano é maior.

A figura 50 exhibe os resultados para a edificação de três pavimentos para Fortaleza e Curitiba. Assim como no caso de um pavimento, os consumos de equipamentos e iluminação foram constantes, apresentando valores de 88,4 kWh/ano e 64,5 kWh/ano respectivamente, em todos os cenários. Já o consumo relativo à refrigeração apresentou valores médios de 109,3 kWh/ano para Fortaleza e de 49,3 kWh/ano para Curitiba.

Figura 50 – Consumo anual de eletricidade para edificação de três pavimentos, considerando os gastos energéticos com ar-condicionado, iluminação e equipamentos nas cidades de Fortaleza e Curitiba.



Fonte: A autora.

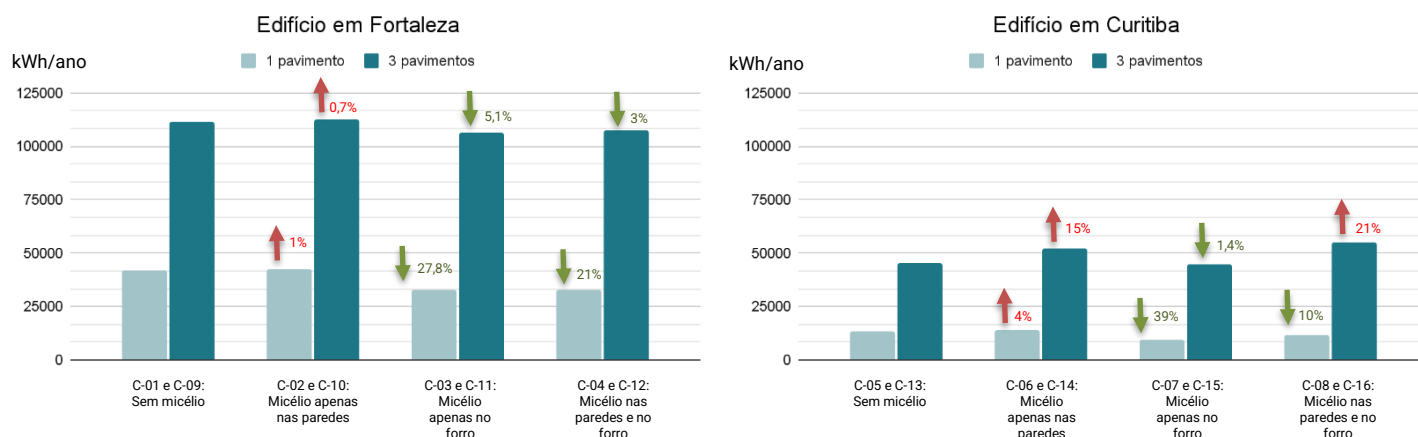
Quando comparado os cenários C-01 e C-05 com os cenários C-09 e C-13, respectivamente, percebeu-se que o consumo energético total aumentou 176,8 kWh/ano em Fortaleza e 139,1 kWh/ano em Curitiba. Somando-se as três colunas, os consumos totais de energia foram de 264,5 kWh/ano para Fortaleza (C-05) e de 198,2 kWh/ano para Curitiba (C-13), com uma diferença de 33% entre as cidades.

Desta maneira, conclui-se que os consumos de eletricidade totais foram menores para Curitiba do que para Fortaleza e isso se deve às características bioclimáticas de cada cidade (Fortaleza possui um clima mais quente) e por conta do número de pavimentos da edificação estudada.

Ressalta-se que esses valores se encontram em conformidade com Franco (2023) que também simulou em seu estudo cidades nas zonas ZB1 e ZB8. Em seus resultados, percebeu-se um aumento da quantidade de energia consumida por metro quadrado nas edificações mais altas. Araujo (2023) aponta que esse fato pode ser explicado pelo maior aprisionamento do calor do exterior (pela grande área envidraçada na fachada) e pelo calor gerado pelos equipamentos, pessoas e iluminação no interior da edificação, que acabam sendo em maior quantidade nas construções mais altas do que nas mais baixas.

Tendo em vista que os valores para equipamentos e iluminação não sofreram alteração entre os cenários, elaborou-se a Figura 51 para demonstrar e comparar os cenários considerando apenas o consumo energético anual para refrigeração, em kWh/ano, nas edificações de um e três pavimentos em Fortaleza e Curitiba.

Figura 51 – Consumo energético anual de ar-condicionado para edificação de um e três pavimentos, nas cidades de Fortaleza e Curitiba.



Fonte: A autora.

Em Fortaleza, o C-03 e C-11, caracterizados pela aplicação de micélio apenas no forro, apresentaram o melhor desempenho em termos de economia energética. Quando comparados com os cenários C-01 e C-09 (sem micélio), a redução no consumo de energia foi de 27,8% para o edifício de um pavimento (C-03) e de 5,1% para o edifício de três pavimentos (C-11).

Resultados semelhantes foram observados em Curitiba, onde os cenários C-07 e C-15 obtiveram uma economia de 39% no edifício de um pavimento (C-07) e de 1,4% no edifício de três pavimentos (C-15), em comparação com os cenários C-05 e C-13 (sem micélio).

Estes resultados indicaram que a aplicação do micélio apenas no forro já seria suficiente para gerar uma economia energética e financeira, considerando que não seria necessário investir na aplicação do material em paredes.

A análise dos valores de 27,8% (C-03) e 39% (C-07) referente à edificação de um pavimento, revelam os melhores resultados, corroborados por estudos anteriores, como o de Zhang *et al.* (2022), que detectaram maior economia energética em climas mais frios, como em Curitiba.

Em contrapartida, os cenários C-14 e C-16, ambos em Curitiba, que utilizaram micélio nas paredes internas, apresentaram um aumento significativo no gasto energético (como indicado na Figura 51). Além disso, nos cenários C-04 e C-08 (da edificação de um pavimento) percebeu-se que houve uma redução do consumo energético maior em Fortaleza do que em Curitiba. Estas análises revelaram que a altura da edificação pode causar um maior efeito na economia energética do que a diferença climática entre as cidades.

Adicionalmente, quando analisadas as porcentagens da edificação de três pavimentos, com 5,1% (C-11) e 1,4% (C-15), evidenciou-se que a eficiência energética em edificações mais baixas (de um pavimento) foi mais expressiva do que nas edificações mais altas (de três pavimentos). Isso pode ocorrer por dois fatores: (i) o efeito de superaquecimento que os isolantes térmicos causam nas fachadas, devido a maior área exposta ao Sol e (ii) em edifícios de um único pavimento, a área de cobertura (telhado) é proporcionalmente maior em relação à altura da edificação, o que pode ter potencializado a economia energética de isolamento no forro nos cenários C-03, C-11, C-07 e C-15.

Nesse contexto, a lã isolante de micélio apresentou-se como promissora em aplicações de forros internos de edifícios comerciais mais baixos, como shoppings, escolas e hospitais, evitando seu uso em fachadas (ou áreas externas) de edifícios mais verticalizados.

Embora pesquisas adicionais sejam necessárias na simulação de outras tipologias, salienta-se que provavelmente todas possuiriam a característica da elevada carga térmica de aquecimento, gerada pela alta taxa de ocupação e quantidade de equipamentos. Nesse sentido, para edificações residenciais, a aplicação do micélio pode ser diferente, podendo ser utilizado como vedação vertical, considerando que a carga interna de uma residência é consideravelmente menor.

Por fim, em uma análise comparativa do melhor caso (C-07), ao trocar o micélio pela lã de rocha como isolante, obteve-se uma economia energética de 26,7%, enquanto o micélio proporcionou uma redução de 39%. Tal diferença evidencia o potencial do micélio como substituto de isolantes termoacústicos convencionais, como a lã de rocha, diante do contexto climático brasileiro.

CAPÍTULO 6

Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados as principais conclusões e propostas para futuros trabalhos diante do que foi encontrado nesta pesquisa.

Em relação a **revisão sistemática da literatura**, concluiu-se que:

O micélio oferece muitas vantagens, como o reaproveitamento de resíduos, renovabilidade, degradabilidade e menores impactos ambientais em sua produção (especialmente de emissão de carbono). No entanto, também foram encontradas algumas restrições: os blocos (painéis ou lâs) de micélio são inadequados para fins estruturais (possuem baixa resistência à compressão e tração) e são sensíveis à água e ao fogo. Dessa forma, não conseguem substituir os materiais estruturais convencionais (concreto, tijolo, aço), sendo mais indicados para utilização em embalagens, forramentos, painéis isolantes, divisórias, enchimento de portas ou espumas. Diante disso, o emprego de outras técnicas inovadoras, como à impressão 3D, o desenvolvimento de materiais compósitos, como concretos e bioespumas de micélio, também poderiam melhorar as propriedades do material e facilitar outras aplicações arquitetônicas.

Em relação ao **método experimental**, concluiu-se que:

- O uso da espécie *Pleurotus ostreatus* e o resíduo da casca de café apresentaram resultados promissores no crescimento da lâ isolante de micélio, a partir de 14 dias da etapa de crescimento. Apesar do material apresentar um resultado satisfatório, sua fragilidade dificultou a realização de alguns ensaios, como o de condutividade térmica e resistência mecânica. Nesse sentido, pretende-se em futuros trabalhos, produzir um material mais resistente e competitivo, visando ganhar escala industrial e comercial para ser mais facilmente incorporado pelo mercado construtivo.
- Quando analisado as características do bioagregado (casca de café) encontrou-se os valores médios para massa específica aparente de 400 kg/m^3 e do teor de umidade de 15,64%. Pela análise da Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV) constatou-se que as bordas eram mais porosas, o que caracteriza a leveza do bioagregado, justificando os baixos valores de massa específica aparente.
- Para a lâ isolante de micélio foram encontrados os valores médios para massa específica aparente de $292,35 \text{ kg/m}^3$ e de $0,07 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ para condutividade

térmica. Esses valores foram corroborados pela literatura, indicando que o material é adequado para atuar como isolantes térmico nas edificações.

Em relação a **simulação computacional termoenergética**, concluiu-se que:

- O cenário C-07 que contém micélio apenas no forro, na edificação de um pavimento, em Curitiba, foi o caso que se mostrou mais promissor, ou seja, gastou menos energia (39% de economia) durante a operação da edificação simulada. Já no cenário C-03, em Fortaleza, obteve-se uma redução de 27,8% na edificação de um pavimento, o segundo melhor resultado.
- Com base neste achado, a aplicação ideal do micélio seria mais indicada para forros internos em edificações comerciais mais baixas (como shoppings, escolas e hospitais), considerando as premissas e limitações das simulações realizadas.
- Quando comparado o melhor cenário (C-07) substituindo o micélio pela lã de rocha, obteve-se uma economia energética de 26,7%, enquanto o micélio proporcionou uma redução de 39%. Essa diferença evidencia o potencial do micélio como possível substituto de isolantes térmicos convencionais, como a lã de rocha, diante dos climas avaliados.

Em síntese, o presente estudo buscou uma alternativa inovadora de menor impacto ambiental para o setor da arquitetura e construção e contribuiu para o avanço do conhecimento sobre o uso do micélio, especialmente no contexto brasileiro, por meio do desenvolvimento de um método experimental que utilizou um resíduo volumoso e perene no país, a casca de café, contribuindo para uma economia mais circular.

A avaliação das propriedades físicas da lã isolante de micélio, bem como a realização das simulações computacionais para análise do desempenho termoenergético do material em diferentes cenários climáticos brasileiros, permitiu traçar um panorama mais completo do potencial do micélio aplicado nas edificações.

Acredita-se que a investigação do micélio como material de construção representa um passo importante rumo a um futuro mais sustentável para o setor da AECO, e que os resultados obtidos neste trabalho poderão ser replicados e adaptados para diferentes contextos, especialmente no Brasil, e em outros países do Sul Global.

REFERÊNCIAS

ABDELHADY, Omar; SPYRIDONOS, Evgenia; DAHY, Hanaa. Bio-Modules: mycelium-based composites forming a modular interlocking system through a computational design towards sustainable architecture. **Designs**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 20, 1 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/designs7010020>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 9939: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ABREU, H. S., CARVALHO, A. M., OLIVEIRA, M. B.M., PEREIRA, R.P.W., SILVA, H. R., SOUZA, K. C. A., AMPARADO, K. F., CHALITA, D. B. Métodos de análise em química da madeira. *Série Técnica - Floresta e Ambiente*, v. 36, n. 1, p. 1 - 20, 2006.

AIDUANG, Worawoot; JATUWONG, Kritsana; JINANUKUL, Praween; SUWANNARACH, Nakarin; KUMLA, Jaturong; THAMJAREE, Wandee; TEERAPHANTUVAT, Thana; WAROONKUN, Tanut; ORANRATMANEE, Rawiwan; LUMYONG, Saisamorn. Sustainable Innovation: fabrication and characterization of mycelium-based green composites for modern interior materials using agro-industrial wastes and different species of fungi. **Polymers**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 550, 18 fev. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym16040550>

ALEMU, Digafe; TAFESSE, Mesfin; DERESSA, Yohannes Gudetta. Production of Mycoblock from the Mycelium of the Fungus *Pleurotus ostreatus* for Use as Sustainable Construction Materials. **Advances In Materials Science And Engineering**, [S.L.], v. 2022, p. 1-12, 31 ago. 2022. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/2876643>

ALMEIDA, Maíra Nicolau de; HALFELD, Gisele Giovanna; COSTA, Izabel Bernardes da; GUIMARÃES, Luiz Gustavo de Lima; CORDEIRO, Bruna; GUIMARÃES, Valéria Monteze. Exploring the Potential of Coffee Husks as a Raw Material for Second-Generation Ethanol Production. **Bioenergy Research**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 281-293, 16 ago. 2023.

Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-023-10655-x>.

ALMEIDA, Tatiane Pilar de; SILVOSO, Marcos Martinez; BRASILEIRO, Alice de Barros Horizonte. Simulações de desempenho termo-energético para sistemas de vedações verticais em habitações de interesse social. In: SALGADO, Mônica Santos; SILVOSO, Marcos Martinez; GRABOIS, Thiago Melo (org.). **Arquitetura, materialidade e tecnologias digitais**: aplicações na construção e conservação do ambiente construído. Rio de Janeiro: Proarq-Fau/Ufrj, Paisagens Híbridas, 2020. p. 181-205.

AL-QAHTANI, Shouq; KOÇ, Muammer; ISAIFAN, Rima J.. Mycelium-Based Thermal Insulation for Domestic Cooling Footprint Reduction: a review. **Sustainability**, [S.L.], v. 15, n. 17, p. 13217, 3 set. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su151713217>.

ARAUJO, Arthur Ferreira de. Avaliação do Desempenho Termoenergético e das Emissões de Gases de Efeito Estufa no Ciclo de Vida de Sistemas de Cobertura com Biomateriais em Edificações de Escritórios. Dissertação (Programa de Engenharia Civil - COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

ARDRA, R.; KARTHIK, S.; PADMAKUMAR, T. Gautham; KISHNAN, Rohith; SHUKLA, Sanjay Kumar; SATHYAN, Dhanya. Mycelium-infused geopolymer bricks for non-load-bearing walls: experimental investigation and life cycle assessment. **Innovative Infrastructure Solutions**, [S.L.], v. 9, n. 3, 22 fev. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41062-024-01379-8>

ARENAS, Jorge P.; SAKAGAMI, Kimihiro. Sustainable Acoustic Materials. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 16, p. 6540, 13 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12166540>

BAGHERIEHNAJJAR, Gazelle; YOUSEFPOUR, Hossein; RAHIMNEJAD, Mostafa. Multi-objective optimization of mycelium-based bio-composites based on mechanical and environmental considerations. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 407, p. 133346, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133346>

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID). **IDB-TN-01807**: Vamos construir verde? [S.L.], Duo Design, 2020. 125 p.

BARBIERI, José Carlos. **Desenvolvimento sustentável: das origens à agenda 2030**. Petrópolis: Editora Vozes, 2020.

BARTA, Daniel-Gabriel; SIMION, Irina; TIUC, Ancuța-Elena; VASILE, Ovidiu. Mycelium-Based Composites as a Sustainable Solution for Waste Management and Circular Economy. **Materials**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 404, 13 jan. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma17020404>

BOFF, Leonardo. **Sustentabilidade: o que é - o que não é**. Petrópolis: Editora Vozes, 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Brasil é o maior produtor mundial e o segundo maior consumidor de café**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-e-o-maior-produtor-mundial-e-o-segundo-maior-consumidor-de-cafe>

BRASIL. NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>

BRUSCATO, Cláudia; MALVESSI, Eloane; BRANDALISE, Rosmary Nichele; CAMASSOLA, Marli. High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust – Sustainable technology for waste reduction. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 234, p. 225-232, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.150>

CAIXA. **MN AE102: GUIA SELO CASA AZUL + CAIXA**. 20 ed. S.L, 2024. 42 p.

CALDAS, L. R. *et al.* How Different Tools Contribute to Climate Change Mitigation in a Circular Building Environment? A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 3759, 22 mar. 2022.

CALDAS, L. R. Bioconcreto de bambu como estratégia para mitigação e adaptação de edificações às mudanças climáticas no contexto de uma economia circular. [s.l.], v. 1, p. 105–112, 2020. ISBN: 9781119130536.

Carbon Neutral Cities Alliance (CNCA). **City handbook for carbon neutral buildings**. 2024. 55p.

CARVALHO, Beatriz Temtemples de; SILVOSO, Marcos Martinez. Arquitetura com terra na construção sustentável. In: SALGADO, Mônica Santos; SILVOSO, Marcos Martinez; GRABOIS, Thiago Melo (org.). **Arquitetura, materialidade e tecnologias digitais: aplicações na construção e conservação do ambiente construído**. Rio de Janeiro: Proarq-Fau/Ufrj, Paisagens Híbridas, 2020. p. 206-231.

CASCIONE, Valeria; ROBERTS, Matt; ALLEN, Stephen; DAMS, Barrie; MASKELL, Daniel; SHEA, Andy; WALKER, Pete; EMMITT, Stephen. Integration of life cycle assessments (LCA) in circular bio-based wall panel design. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 344, p. 130938, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130938>

CICHOWICZ, Robert. Use of CFD modelling for analysing air parameters in auditorium halls. **E3S Web Of Conferences**, [S.L.], v. 22, p. 00030, 2017. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20172200030>.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, Brasília, DF, v. 10, n. 4 quarto levantamento, dez. 2023

COSTA, B. L. C.; CARVALHO, F. M. S.; ALVES, N. J. N. **Uso de materiais menos impactantes ambientalmente nos selos de edificações**. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 4., 2021, [online]. Anais [...]. Salvador: Universidade Federal da Bahia, [2022].

DRECHSLER-SANTOS, Elisandro Ricardo. **Material Complementar ao livro Sistemática Vegetal I: fungos**. Florianópolis: Universidade de Santa Catarina, 2015.

EIRA, Augusto Ferreira da. Fungos comestíveis. In: ESPOSITO, Elisa; AZEVEDO, João Lúcio de (org.). **Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia**. 2. ed. Caxias do Sul: Educs, 2010.

ELSACKER, Elise; VANDELOOK, Simon; BRANCART, Joost; PEETERS, Eveline; LAET, Lars de. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. **Plos One**, [S.L.], v. 14, n. 7, 22 jul. 2019. Public Library of Science (PLOS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>.

ELSACKER, Elise; SØNDERGAARD, Asbjørn; VAN WYLICK, Aurélie; PEETERS, Eveline; LAET, Lars de. Growing living and multifunctional mycelium composites for large-scale formwork applications using robotic abrasive wire-cutting. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 283, p. 122732, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122732>

ESPOSITO, Elisa; AZEVEDO, João Lúcio de. Introdução. In: ESPOSITO, Elisa; AZEVEDO, João Lúcio de (org.). **Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia**. 2. ed. Caxias do Sul: Educs, 2010.

FARR, Douglas. Urbanismo sustentável: desenho urbano com a natureza. Porto Alegre: Bookman, 2013.

FRANCO, Mariana Sanches de Proença. Integração entre BIM e avaliação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de edificações: Aplicação em bioconcretos. Dissertação (Programa de Engenharia Civil - COPPE) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

GALVAGNO, Miguel Angel; FORCHIASSIN, Flávia. Fisiologia dos fungos: crescimento, morfologia e diferenciação. In: ESPOSITO, Elisa; AZEVEDO, João Lúcio de (org.). **Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia**. 2. ed. Caxias do Sul: Educ, 2010.

GHAZVINIAN, Ali; GÜRSOY, Benay. Mycelium-Based Composite Graded Materials: assessing the effects of time and substrate mixture on mechanical properties. **Biomimetics**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 48, 19 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics7020048>

GIROMETTA, Carolina; PICCO, Anna Maria; BAIGUERA, Rebecca Michela; DONDI, Daniele; BABBINI, Stefano; CARTABIA, Marco; PELLEGRINI, Mirko; SAVINO, Elena. Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: a review. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 281, 8 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11010281>.

GRENON, Valérie; MAREF, Wahid; OUELLET-PLAMONDON, Claudiane M.. Multi-property characterization of an experimental material composed of Pleurotus ostreatus mycelium and ash wood chips compared with glass wool and hemp wool. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 409, p. 133941, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133941>

HANEEF, Muhammad; CESERACCIU, Luca; CANALE, Claudio; BAYER, Ilker S.; HEREDIA-GUERRERO, José A.; ATHANASSIOU, Athanassia. Advanced Materials From Fungal Mycelium: fabrication and tuning of physical properties. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 7, n. 1, 24 jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/srep41292>

HOTZ, Elise C.; BRADSHAW, Alexander J.; ELLIOTT, Casey; CARLSON, Krista; DENTINGER, Bryn T.M.; NALEWAY, Steven E.. Effect of agar concentration on structure and physiology of fungal hyphal systems. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 24, p. 7614-7623, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.013>.

IEA AND UNEP. 2022 Building Construction Global Status Report. United Nations Environment programme. [S.l: s.n.], 2022.

ILGUN, Asya; SCHMICKL, Thomas. Mycelial Beehives of HIVEOPOLIS: designing and building therapeutic inner nest environments for honeybees. **Biomimetics**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 75, 7 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics7020075>

International Network for Bamboo and Rattan (INBAR) 2014. Bamboo: A strategic resource for countries to reduce the effects of climate change. 2014. 28p.

IPCC. Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.l.: s.n.], 2021.

JAUKE, Julian; GOSCH, Lukas; VAŁATKO, Hana; CHRISTIAN, Ingolf; KLAUS, Anita; STAVRIC, Milena. MyCera. Application of mycelial growth within digitally manufactured clay structures. **International Journal Of Architectural Computing**, [S.L.], v. 20, n. 1, p. 31-40, mar. 2022. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/14780771221082248>

JONES, Mitchell; BHAT, Tanmay; HUYNH, Tien; KANDARE, Everson; YUEN, Richard; WANG, Chun H.; JOHN, Sabu. Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. **Fire And Materials**, [S.L.], v. 42, n. 7, p. 816-825, 29 maio 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.2637>

JONES, Mitchell; MAUTNER, Andreas; LUENCO, Stefano; BISMARCK, Alexander; JOHN, Sabu. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: a critical review. **Materials & Design**, [S.L.], v. 187, p. 108397, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>

KAISER, Romy; BRIDGENS, Ben; ELSACKER, Elise; SCOTT, Jane. BioKnit: development of mycelium paste for use with permanent textile formwork. **Frontiers In Bioengineering And Biotechnology**, [S.L.], v. 11, 14 jul. 2023. <http://dx.doi.org/10.3389/fbioe.2023.1229693>

KALLAKAS, H; NÄREP, M; A NÄREP,; POLTIMÄE, T; KERS, J. Mechanical and physical properties of industrial hemp-based insulation materials. **Proceedings Of The Estonian Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 67, n. 2, p. 183, 2018. Estonian Academy Publishers. <http://dx.doi.org/10.3176/proc.2018.2.10>

KIBERT, Charles J. **Edificações sustentáveis**: projeto, construção e operação. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2020.

KOH, C.H.; GAUVIN, F.; SCHOLLBACH, K.; BROUWERS, H.J.H.. Investigation of material characteristics and hygrothermal performances of different bio-based insulation composites. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 346, p. 128440, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128440>

LAGOUIN, Méryl; MAGNIONT, Camille; SÉNÉCHAL, Pascale; MOONEN, Peter; AUBERT, Jean-Emmanuel; LABOREL-PRÉNERON, Aurélie. Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 222, p. 852-871, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004>.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando. Eficiência energética na arquitetura. 3ª ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2014

LARIVOIR, L.C.B.P. **A utilização de sistemas BIM na fase de projeto de edificações para análise de impactos ambientais dos materiais de construção**. 2017. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

LEITE, Clarice Loguercio; ESPOSITO, Elisa. Fungos: estrutura e ultraestrutura. In: ESPOSITO, Elisa; AZEVEDO, João Lúcio de (org.). **Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia**. 2. ed. Caxias do Sul: Educs, 2010.

LINGAM, Divnesh; NARAYAN, Sumesh; MAMUN, Kabir; CHARAN, Dipanshil. Engineered mycelium-based composite materials: comprehensive study of various properties and applications. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 391, p. 131841, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131841>

LIPÍŇSKA, Monika Brandić *et al.* Biological growth as an alternative approach to on and off-Earth construction. **Frontiers In Built Environment**, [S.L.], v. 8, 19 set. 2022. <http://dx.doi.org/10.3389/fbuil.2022.965145>

LIVNE, Achiya; PEARLMUTTER, David; GAL, Erez; WÖSTEN, Han A.B.. Increased CO₂ fixation and reduced embodied energy of mycelium bio-composite materials grown on a mixed substrate over diurnal temperature cycles. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 421, p. 135566, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135566>

MALMQVIST, Tove; NEHASILOVA, Marie; MONCASTER, Alice; BIRGISDOTTIR, Harpa; RASMUSSEN, Freja Nygaard; WIBERG, Aoife Houlihan; POTTING, José. Design and construction strategies for reducing embodied impacts from buildings – Case study analysis. **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 166, p. 35-47, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.033>

MANAN, Sehrish; ULLAH, Muhammad Wajid; UL-ISLAM, Mazhar; ATTA, Omar Mohammad; YANG, Guang. Synthesis and applications of fungal mycelium-based advanced functional materials. **Journal Of Bioresources And Bioproducts**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 1-10, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.001>

MBABALI, Herman; LUBWAMA, Michael; YIGA, Vianney Andrew; WERE, Evans; KASEDDE, Hillary. Development of Rice Husk and Sawdust Mycelium-Based Bio-composites: optimization of mechanical, physical and thermal properties. **Journal Of The Institution Of Engineers (India): Series D**, [S.L.], v. 105, n. 1, p. 97-117, 24 fev. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40033-023-00458-x>

MODANLOO, Behzad; GHAZVINIAN, Ali; MATINI, Mohammadreza; ANDAROODI, Elham. Tilted Arch; Implementation of Additive Manufacturing and Bio-Welding of Mycelium-Based Composites. **Biomimetics**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 68, 30 nov. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics6040068>

MOHSENI, Alale; VIEIRA, Fabricio Rocha; PECCHIA, John A.; GÜRSOY, Benay. Three-Dimensional Printing of Living Mycelium-Based Composites: material compositions, workflows, and ways to mitigate contamination. **Biomimetics**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 257, 14 jun. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics8020257>

MOUTON, Lise; ALLACKER, Karen; RÖCK, Martin. Bio-based building material solutions for environmental benefits over conventional construction products – Life cycle assessment of regenerative design strategies (1/2). **Energy And Buildings**, [S.L.], v. 282, p. 112767, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112767>

ONGPENG, Jason Maximino C.; INCIONG, Edward; SENDO, Vince; SOLIMAN, Crizia; SIGGAOAT, Adrian. Using Waste in Producing Bio-Composite Mycelium Bricks. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 10, n. 15, p. 5303, 31 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app10155303>

ÖZDEMİR, Eda; SAEIDI, Nazanin; JAVADIAN, Alireza; ROSSI, Andrea; NOLTE, Nadja; REN, Shibo; DWAN, Albert; ACOSTA, Ivan; HEBEL, Dirk E.; WURM, Jan. Wood-Veneer-Reinforced Mycelium Composites for Sustainable Building Components. **Biomimetics**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 39, 31 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics7020039>

PAIVA, Rayane de Lima Moura. **Desenvolvimento e avaliação do desempenho físico, mecânico, hidrotérmico, ambiental e durabilidade biológica de argamassas com terra e partículas de bambu**. 2022. 288 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

PAIVA, Rayane de Lima Moura; CALDAS, Lucas Rosse; MARTINS, Adriana Paiva de Souza; SOUSA, Patricia Brandão de; OLIVEIRA, Giulia Fea de; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Thermal-Energy Analysis and Life Cycle GHG Emissions Assessments of Innovative Earth-Based Bamboo Plastering Mortars. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 18, p. 10429, 18 set. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su131810429>.

PAWAR, B. S., & KANADE, G. Energy Optimization of Building Using DesignBuilder Software. *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*, 4(1), 69–73, 2018. www.ijntr.org

PELLETIER, M.G.; HOLT, G.A.; WANJURA, J.D.; GREETHAM, L.; MCINTYRE, G.; BAYER, E.; KAPLAN-BIE, J.. Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 139, p. 111533, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111533>

PEREIRA, V., SANTOS, J., LEITE, F., & ESCÓRCIO, P. Using BIM to improve building energy efficiency – A scientometric and systematic review. **Energy and Buildings**, 250, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111292>

POMPONI, Francesco; HART, Jim; AREHART, Jay H.; D'AMICO, Bernardino. Buildings as a Global Carbon Sink? A Reality Check on Feasibility Limits. **One Earth**, [S.L.], v. 3, n. 2, p. 157-161, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.018>

RăUT, Iuliana; CăLIN, Mariana; VULUGA, Zina; OANCEA, Florin; PACEAGIU, Jenica; RADU, Nicoleta; DONI, Mihaela; ALEXANDRESCU, Elvira; PURCAR, Violeta; GURBAN, Ana-Maria. Fungal Based Biopolymer Composites for Construction Materials. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 2906, 28 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14112906>

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. Combustão e gasificação de biomassas sólidas: solução energética para a Amazônia. Brasília: Ministério das Minas e Energia, 2008.

REZENDE, J. B.; WEKHAIZER, C. Q.; VALE, J. L. R. V.; DE PAULA, J. T. da R.; DE SOUZA, R. A. S.; SILVA, L. K. S.; VERTICCHIO, V. J. O. **Biofabricação digital para a produção de micélios na arquitetura e design**. In: ENCONTRO LATINO AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 4., 2021. Anais [...]. [S. l.], 2021. p. 332–344. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/view/2525>

SAENGER, M; HARTGE, E.-U; WERTHER, J; OGADA, T; SIAGI, Z. Combustion of coffee husks. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 103-121, maio 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481\(00\)00106-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481(00)00106-3).

SAEZ, Dana; GRIZMANN, Denis; TRAUTZ, Martin; WERNER, Anett. Exploring the Binding Capacity of Mycelium and Wood-Based Composites for Use in Construction. **Biomimetics**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 78, 11 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/biomimetics7020078>

SALGADO, M. S. Tecnologias digitais, pandemia e sustentabilidade nas “smart cities”. In: SALGADO, Mônica Santos; SILVOSO, Marcos Martinez; GRABOIS, Thiago Melo (org.). **Arquitetura, Materialidade e Tecnologias Digitais: Aplicações na produção e conservação do ambiente construído**. Rio de Janeiro: PROARQ-FAU/UFRJ, Paisagens Híbridas, 2020.

SANTOS, Daniela Vilas Bôas Braga dos; PASIN, Liliana Auxiliadora Avelar Pereira. Avaliação do efeito do extrato aquoso da casca de café na germinação e desenvolvimento inicial de diferentes espécies vegetais. In: XIII Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 2016, Poços de Caldas. **Anais Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas**. Poços de Caldas: Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 2016. v. 8.

SHARMA, Rahul; SUMBRIA, Rohan. Mycelium bricks and composites for sustainable construction industry: a state-of-the-art review. **Innovative Infrastructure Solutions**, [S.L.], v. 7, n. 5, p. 0-0, 6 ago. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41062-022-00903-y>

SILVA, Manuela da.; ESPOSITO, Elisa. O papel dos fungos na recuperação ambiental. In: ESPOSITO, Elisa; AZEVEDO, João Lúcio de (org.). **Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia**. 2. ed. Caxias do Sul: Educs, 2010.

SILVA, Camila Joyce Alves da; MALTA, Diana Jussara do Nascimento. A IMPORTÂNCIA DOS FUNGOS NA BIOTECNOLOGIA. **Cadernos de Graduação**. Recife, jul. 2016. p. 49-66.

SILVA, Marliane C.s. da; NAOZUKA, Juliana; LUZ, José Maria R. da; ASSUNÇÃO, Laélia S. de; OLIVEIRA, Pedro V.; VANETTI, Maria C.D.; BAZZOLLI, Denise M.s.; KASUYA, Maria C.M.. Enrichment of *Pleurotus ostreatus* mushrooms with selenium in coffee husks. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 131, n. 2, p. 558-563, mar. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.023>

SILVA, L. C., CALDAS, L. R., PAIVA, R. L. M., FILHO, R.D.T. Role of Bio-based Building Materials in Climate Change Mitigation: **Special Report of the Brazilian Panel on Climate Change**, n. August, p. 20, 2018.

SOUZA, Eduardo, 2020. Figura 13. **Hy-Fi Tower**. https://www.archdaily.com.br/br/948979/edificios-de-cogumelos-as-possibilidades-do-uso-do-micelio-na-arquitetura?ad_medium=gallery

TETERIS, Carlina. 2017. Figura 14. **MycoTree**. <https://www.world-architects.com/en/architecture-news/works/mycotree>

TINOCO, Matheus Pimentel; GOUVÊA, Lucas; MARTINS, Karenn de Cássia Magalhães; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; REALES, Oscar Aurelio Mendoza. The use of rice husk particles to adjust the rheological properties of 3D printable cementitious composites through water sorption. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 365, p. 130046, fev. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130046>.

TRABELSI, Marah; MAMUN, Ai; KLÖCKER, Michaela; BROCKHAGEN, Bennet; KINZEL, Franziska; KAPANADZE, Dato; SABANTINA, Lilia. Polyacrylonitrile (PAN) nanofiber mats for mushroom mycelium growth investigations and formation of mycelium-reinforced nanocomposites. **Journal Of Engineered Fibers And Fabrics**, [S.L.], v. 16, p. 155892502110379, jan. 2021. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/15589250211037982>

VAN NGUYEN, Dung; DUONG, Cham Thi Thu; VU, Chau Ngoc Minh; NGUYEN, Hung Minh; PHAM, Tuyet Thi; TRAN-THUY, Tuyet-Mai; NGUYEN, Long Quang. Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product. **Data In Brief**, [S.L.], v. 51, p. 109781, dez. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dib.2023.109781>.

VIEL, Marie; COLLET, Florence; LANOS, Christophe. Chemical and multi-physical characterization of agro-resources' by-product as a possible raw building material. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 120, p. 214-237, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.025>.

VOLK, Rebekka; SCHRÖTER, Marius; SAEIDI, Nazanin; STEFFL, Simon; JAVADIAN, Alireza; HEBEL, Dirk E.; SCHULTMANN, Frank. Life cycle assessment of mycelium-based composite materials. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 205, p. 107579, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107579>

WICKSTRÖM, Ulf. **Temperature Calculation in Fire Safety Engineering**. Suíça: Springer Cham, 2016. 243 p.

XING, Yangang; BREWER, Matthew; EL-GHARABAWY, Hoda; GRIFFITH, Gareth; JONES, Phil. Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 121, p. 022032, fev. 2018. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/121/2/022032>.

YADAV, Madhura; SAINI, Ayushi. Opportunities & challenges of hempcrete as a building material for construction: an overview. **Materials Today: Proceedings**. Rajasthan, p. 2021-2028. 22 jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.576>

ZHANG, Xijin; FAN, Xudong; HAN, Chanjuan; LI, Yanjun; PRICE, Erik; WNEK, Gary; LIAO, Ya-Ting T.; YU, Xiong (Bill). Novel strategies to grow natural fibers with improved thermal stability and fire resistance. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 320, p. 128729, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128729>

ZHANG, Xijin; HU, Jianying; FAN, Xudong; YU, Xiong. Naturally grown mycelium-composite as sustainable building insulation materials. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 342, p. 130784, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130784>

ZHANG, Mingchang; ZHANG, Zhenxin; ZHANG, Runhua; PENG, Yao; WANG, Mingzhi; CAO, Jinzhen. Lightweight, thermal insulation, hydrophobic mycelium composites with hierarchical porous structure: design, manufacture and applications. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 266, p. 111003, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111003>

APÊNDICE

AUTOR / ANO	ESPÉCIE UTILIZADA	SUBSTRATO	ELEMENTO / APLICAÇÃO	ENSAIOS REALIZADOS	DENSIDADE	CONDUTIV. TÉRMICA
Mbabali, 2024	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Cascas de arroz e serragem	Bioespuma	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Ardra, 2024	<i>Pleurotus ostreatus</i>	cinza de micélio (entre outros elementos para bioconcreto)	Bioconcreto	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Livne, 2024	<i>Trametes hirsuta</i>	Canas de cânhamo puro, palha de colza, celulose processada	Bloco de micélio	Propriedades térmicas e mecânicas; Absorção de água; Expansão em alta umidade	palha = 430 kg/m³ e celulose = 634 kg/m³	palha = 0,026 W/mK celulose = 0,068 W/mK
Barta, 2024	<i>Ganoderma lucidum</i> e <i>T. versicolor</i>	Borra de café gasta; palha de café; palha de feno; pó de cânhamo; mistura de cereais	Bloco de micélio	Teste e avaliação da absorção sonora	-	-
Aiduang, 2024	<i>Ganoderma fornicatum</i> , <i>Ganoderma williamsianum</i> , <i>Lentinus sajor-caju</i> , <i>Trametes coccinea</i>	Serragem de bambu e pericarpo de milho	Bloco de micélio	Teor de umidade, retração, densidade, absorção de água, inchaço volumétrico, degradação térmica e propriedades mecânicas (flexão, compressão, impacto e resistência à tração)	212 a 281kg/m³	-
Grenon, 2023	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Aparas de madeira de carvalho	Bloco de micélio	resistência à compressão , a condutividade térmica, o volume, a massa volumétrica e a porosidade.	1.380 kg/m³	0,03 W/mK
Bagheriehnaajjar; Yousefpour; Rahimnejad, 2023	<i>Trametes versicolor</i>	Serragem, aparas de madeira, fibras finas e grossas de bambu	Bloco de micélio (cilindro)	Resistência à compressão e flexão de três pontos	161,92 kg/m³	-

AUTOR / ANO	ESPÉCIE UTILIZADA	SUBSTRATO	ELEMENTO / APLICAÇÃO	ENSAIOS REALIZADOS	DENSIDADE	CONDUTIV. TÉRMICA
Zhang et al., 2023	Trametes versicolor	Serragem de choupo e bétula	Bloco de micélio (cilindro)	Caracterização, condutividade térmica, inchaço hidrofóbico	123,87 kg/m³	0,05 W/mK
Lingam et al., 2023	Pleurotus ostreatus	Capim juncão, bagaço de cana, casca de coco	Bloco de micélio (placa)	Resistência à flexão, compressão e resistência ao fogo	229 kg/m³	-
Mohseni et al., 2023	Pleurotus ostreatus	Papelão	Impressão 3D	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Kaiser et al., 2023	Ganoderma lucidum	Serragem e fôrma têxtil	“Myconcrete”	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Özdemir et al., 2022	Ganoderma lucidum	Restos de cânhamo misturados com farelo de trigo e sulfato de cálcio (CaSO4)	Compósito impresso 3D com lâmina de madeira e mistura de cânhamo com micélio	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Koh et al., 2022	Não especificado	compósito de micélio, palha, miscanthus e linho; grama; cânhamo; e cortiça expandida.	Simulação com parede de tijolos e parede com estrutura de madeira com cavidade de ar	Caracterização térmica e hídrica (simulados sob vários perfis climáticos da Europa)	97 kg/m³	-
Rahman, 2022	Fungos pertencentes ao grupo dos Basidiomicetos	Material de mistura de biomassa e fungos, farinha de trigo, água e pó de casca de psyllium	Impressão 3D	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável

AUTOR / ANO	ESPÉCIE UTILIZADA	SUBSTRATO	ELEMENTO / APLICAÇÃO	ENSAIOS REALIZADOS	DENSIDADE	CONDUTIV. TÉRMICA
Saez et al., 2022	G. lucidum e Pycnoporus sanguineus	Madeira de faia	Bloco "sanduíche" de micélio	Resistência ao cisalhamento	500 kg/m ³	-
Zhang et al., 2022	Pleurotus ostreatus	Grãos de centeio	Bloco de micélio	Caracterização microestrutural, comportamento de umidade, teste de flexão de 3 pontos, densidade, condutividade térmica	599 kg/m ³	-
Alemu; Tafesse; Deressa, 2022	Pleurotus ostreatus	Serragem, bagaço de cana e casca de café	Bloco de micélio	Caracterização físico-químicas e mecânicas, densidade, absorção de água e resistência à compressão	292,35 kg/m ³ (casca de café); 343,44 kg/m ³ (serragem); 331,65 kg/m ³ (bagaço)	-
Sharma e Sumbria, 2022	-	-	Revisão	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Brandić Lipińska et al., 2022	Ganoderma lucidum, Cryptococcus neoformans, Bacillus subtilis, Phellinus linteus, Annulohypoxylon	regolito lunar, basalto, concreto de enxofre, micoterial	andaimes, estruturas infláveis e drop-stitch para construções fora da Terra	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Ilgun e Schmickl, 2022	Principalmente Trametes versicolor, mas também Pleurotus ostreatus, Ganoderma lucidum, Hericium erinaceus, Grifola frondosa	Não especificado	Mistura para impressão 3D de colmeias	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável

AUTOR / ANO	ESPÉCIE UTILIZADA	SUBSTRATO	ELEMENTO / APLICAÇÃO	ENSAIOS REALIZADOS	DENSIDADE	CONDUTIV. TÉRMICA
Ghazvinian e Gürsoy, 2022	Pleurotus ostreatus	Serragem de carvalho e palha de trigo em diversas proporções	Blocos de micélio	Resistência à compressão	-	-
Jauk et al., 2022	Pleurotus ostreatus e Ganoderma lucidum, que foi descartada por conta de contaminação	Argila, água e partes orgânicas (serragem e celulose)	Mistura chamada MyCera para impressão 3D	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Adamatzky e Gandia, 2022	Ganoderma resinaceum	Cânhamo e soja	Blocos de micélio	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Räut et al., 2021	Ganoderma lucidum	Palha de trigo, micélio fúngico e polipropileno incorporado com esporos bacterianos (Bacillus amyloliquefaciens)	Blocos de micélio (placa)	Análise morfológica do material, caracterização química, condutividade térmica, e compressão	-	0,03 W/mK
Modanloo et al., 2021	Pleurotus ostreatus	Papelão e papel picados, serragem, palha picada	Impressão 3D	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Bhardwaj, 2021	Não especificado	pó de casca de psyllium, biomassa-fungos e farinha de trigo	Impressão 3D	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável

AUTOR / ANO	ESPÉCIE UTILIZADA	SUBSTRATO	ELEMENTO / APLICAÇÃO	ENSAIOS REALIZADOS	DENSIDADE	CONDUTIV. TÉRMICA
Zhang et al., 2021	Pleurotus ostreatus e Fusarium oxysporum	Solução a base de batata + silicato de sódio	Fibras fúngicas	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Elsacker et al., 2021	Trametes versicolor e Ganoderma resinaceum	Fibras de cânhamo e serragem	Blocos de micélio e material para fabricação digital	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Trabelsi et al., 2021	Pleurotus ostreatus	Ágar, extrato de malte e peptona (solução líquida)	Compósitos de micélio reforçados com nanomateriais	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Manan et al., 2021	-	-	Revisão	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Ongpeng et al., 2020	Não especificado	Serragem e farelo de arroz, com e sem micélio	Blocos de substrato com e sem micélio, comparados com tijolo de argila	Resistência à compressão e flexão	-	-
Bruscató et al., 2019	Pycnoporus sanguineus, Pleurotus albidus e Lentinus velutinus	Serragem e farelo de trigo.	Bioespuma	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Jones et al., 2018	Trametes versicolor	Casca de arroz e grão de trigo	Compósitos de micélio	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável