



CAMILA FURTADO LIMA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA
DURABILIDADE DE BIOCOMPÓSITO DE ADOBE COM
INSERÇÃO DE MICÉLIO PARA APLICAÇÕES
SUSTENTÁVEIS**

**LAVRAS – MG
2026**

CAMILA FURTADO LIMA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA DURABILIDADE DE
BIOCOMPÓSITO DE ADOBE COM INSERÇÃO DE MICÉLIO PARA
APLICAÇÕES SUSTENTÁVEIS**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Lavras, como parte das exigências
do Programa de Pós Graduação em Engenharia
de Biomateriais, para obtenção do título de
Mestre.

Prof. Dr. Mario Guimarães Junior
Orientador

Prof.^a Dra. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa
Coorientadora

Prof.^a Dra. Tatiana Cardoso e Búfalo
Coorientadora

**LAVRAS - MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Lima, Camila Furtado.

Estudo das propriedades mecânicas e da durabilidade de biocompósito de adobe
com inserção de micélio para aplicações sustentáveis / Camila Furtado Lima. - 2026.
133 p. : il.

Orientador: Mario Guimarães Junior

Coorientadora: Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa

Coorientadora: Tatiana Cardoso e Búfalo

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. adobe. 2. biocompósitos. 3. micélio. 4. biomassa. 5. construção sustentável. I.
Guimarães Junior, Mario. II. Corrêa, Andréa Aparecida Ribeiro. III. Cardoso e Búfalo,
Tatiana. IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

CAMILA FURTADO LIMA

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA DURABILIDADE DE
BIOCOMPÓSITO DE ADOBE COM INSERÇÃO DE MICÉLIO PARA APLICAÇÕES
SUSTENTÁVEIS**

**STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND DURABILITY OF ADOBE
BIOCOMPOSITE WITH MYCELIUM INSERTION FOR SUSTAINABLE
APPLICATIONS**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Lavras, como parte das exigências
do Programa de Pós Graduação em Engenharia
de Biomateriais, para obtenção do título de
Mestre.

APROVADA em 27 de março de 2026

Dr. Mario Guimarães Junior - UFLA - MG/CEFET - MG

Dra. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares - CEFET - MG

Dra. Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira - UFLA - MG

Prof. Dr. Mario Guimarães Junior
Orientador

Prof.^a Dra. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa
Coorientadora

Prof.^a Dra. Tatiana Cardoso e Búfalo
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2026**

Dedico este trabalho à minha família, pelo amor incondicional e, apoio em todos os momentos. Obrigada por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava. Aos meus amigos, pela paciência, pela escuta e pelas palavras de incentivo que tornaram esta caminhada mais leve. A cada um de vocês, que de alguma forma contribuiu para que este sonho se tornasse realidade, deixo aqui minha mais profunda gratidão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Lavras – UFLA, ao Departamento de Ciências Florestais e ao Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Biomateriais da UFLA – PPGBIOMAT/UFLA, pela estrutura oferecida e pela oportunidade de realização do Mestrado.

Agradeço a Capes, CNPq e FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos, que tornou possível a realização do Mestrado.

Aos meus orientadores e professores, agradeço pela orientação, paciência e dedicação durante todo o percurso acadêmico. Suas contribuições, conselhos e ensinamentos foram essenciais para o desenvolvimento dessa pesquisa e para o meu crescimento profissional e pessoal. Meus sinceros agradecimentos aos departamentos de Engenharia Florestal, Engenharia Civil, Solos e Biologia. Também agradeço, pela a oportunidade de ter sido muito bem recebida e orientada por todo(as)s os(as) técnicos(as) e coordenadores de laboratório que utilizei durante a execução da pesquisa.

Aos colegas e amigos que compartilharam comigo momentos de aprendizado, parceria e amizade, deixo a minha gratidão pela convivência e pelo apoio durante os desafios da jornada. Cada conversa, risada e gesto de incentivo fez toda a diferença ao longo deste processo.

À minha família, expresso o meu mais profundo agradecimento, pelo amor, compreensão e suporte incondicional em todos os momentos. Fico muito grata por terem acreditado, juntamente comigo, que era possível a realização desse sonho, mesmo quando o caminho parecia incerto. Sem o apoio, força e o carinho de vocês, esta conquista não seria possível.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com palavras de incentivo, ajuda prática ou simplesmente pela presença constante. A cada um, o meu sincero muito obrigada.

RESUMO

A crescente necessidade de reduzir os impactos ambientais da construção civil tem impulsionado o desenvolvimento de materiais sustentáveis alinhados aos princípios da economia circular e às metas da Agenda 2030 da ONU, especialmente as ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Nesse contexto, os sistemas construtivos em terra crua reaparecem como alternativa promissora, por utilizarem recursos locais, demandarem baixo consumo energético e possibilitarem reciclagem ao fim da vida útil. Entretanto, a limitada resistência mecânica e a elevada susceptibilidade à umidade ainda constituem barreiras importantes à ampliação de seu uso. Diante desse problema, a pesquisa investigou a viabilidade técnica da incorporação de microrganismos na forma de micélio em compósitos de adobe, configurando uma proposta inovadora de bioconsolidação do material. A justificativa reside na busca por biotecnologias capazes de melhorar o desempenho mecânico e de durabilidade da terra crua sem comprometer seus atributos ambientais, contribuindo para a transição para materiais regenerativos. Inicialmente, caracterizou-se o solo quanto à granulometria, plasticidade e mineralogia, obtendo-se composição média de 62% de areia, 13% de silte e 25% de argila. Os limites de liquidez (29,45%), plasticidade (20,92%) e contração (17,32%) classificaram o solo como de baixa plasticidade, adequado à moldagem de adobes. A mineralogia revelou predominância de caulinita (71,4%), acompanhada de gipsita, quartzo, goethita e hematita. Na fase experimental, produziram-se compósitos submetidos a quatro tratamentos, cada um com cinco repetições: TC (controle), TCB (caldo de batata), TM2 (2% de micélio) e TM5 (5% de micélio). Em todos os tratamentos modificados adicionou-se 2% de cal hidratada CH-I. Os corpos de prova mantiveram dimensões médias próximas de 76,11 mm, com retração linear variando entre 4,21% (TM2) e 7,76% (TM5). A resistência à compressão apresentou valores médios de 0,97 MPa (TC), 0,29 MPa (TCB), 0,43 MPa (TM2) e 1,23 MPa para o (TM5), este último superando em 27% o valor do tratamento controle. Os resultados de durabilidade também foram mais favoráveis ao TM5, cuja absorção por capilaridade (180 min) foi de 7,58% e por imersão (24h) de 8,84%, além da menor perda de massa (3,80%). De forma geral, constatou-se que o solo é tecnicamente adequado para a produção de adobes e que os tratamentos não comprometeram a estabilidade dimensional. Os resultados evidenciam o potencial do uso de micélio como agente modificador, especialmente no compósito com 5% de incorporação, que apresentou o maior valor de resistência à compressão (1,23 MPa) e melhor desempenho global, sendo indicado, portanto, para uso não estrutural. Assim, a pesquisa contribui para o avanço do conhecimento sobre biocompósitos à base de terra, reforçando a possibilidade de desenvolver materiais construtivos mais sustentáveis, alinhados à economia circular e aos objetivos ambientais contemporâneos.

Palavras-chave: adobe; biocompósitos; micélio; biomassa; construção sustentável.

ABSTRACT

The growing need to reduce the environmental impacts of construction has driven the development of sustainable materials aligned with the principles of the circular economy and the goals of the UN 2030 Agenda, especially SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). In this context, raw earth construction systems reappear as a promising alternative, as they use local resources, require low energy consumption and enable recycling at the end of their useful life. However, the limited mechanical resistance and high susceptibility to humidity still constitute important barriers to expanding its use. Faced with this problem, the research investigated the technical feasibility of incorporating microorganisms in the form of mycelium into adobe composites, configuring an innovative proposal for bioconsolidation of the material. The justification lies in the search for biotechnologies capable of improving the mechanical performance and durability of raw earth without compromising its environmental attributes, contributing to the transition to regenerative materials. Initially, the soil was characterized in terms of grain size, plasticity and mineralogy, obtaining an average composition of 62% sand, 13% silt and 25% clay. The limits of liquidity (29.45%), plasticity (20.92%) and contraction (17.32%) classified the soil as having low plasticity, suitable for molding adobes. Mineralogy revealed a predominance of kaolinite (71.4%), accompanied by gypsum, quartz, goethite and hematite. In the experimental phase, composites were produced subjected to four treatments, each with five replications: TC (control), TCB (potato broth), TM2 (2% mycelium) and TM5 (5% mycelium). In all modified treatments, 2% CH-I hydrated lime was added. The specimens maintained average dimensions close to 76.11 mm, with linear shrinkage varying between 4.21% (TM2) and 7.76% (TM5). Compressive strength presented average values of 0.97 MPa (TC), 0.29 MPa (TCB), 0.43 MPa (TM2) and 1.23 MPa for (TM5), the latter exceeding the value of the control treatment by 27%. The durability results were also more favorable to TM5, whose absorption by capillarity (180 min) was 7.58% and by immersion (24h) was 8.84%, in addition to the lower mass loss (3.80%). In general, it was found that the soil is technically suitable for the production of adobes and that the treatments did not compromise dimensional stability. The results highlight the potential of using mycelium as a modifying agent, especially in the composite with 5% incorporation, which presented the highest compressive strength value (1.23 MPa) and best overall performance, therefore being indicated for non-structural use. Thus, the research contributes to the advancement of knowledge about earth-based biocomposites, reinforcing the possibility of developing more sustainable construction materials, aligned with the circular economy and contemporary environmental objectives.

Keywords: adobe; biocomposites; mycelium; biomass; sustainable construction.

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa apresenta impactos expressivos nas dimensões ambiental, tecnológica, social e econômica ao propor o desenvolvimento e a avaliação de biocompósitos à base de terra crua reforçados com micélio, alinhados aos princípios da economia circular e às diretrizes da Agenda 2030. No âmbito tecnológico, os resultados obtidos evidenciam ganhos quantitativos relevantes, com destaque para o aumento de 27% na resistência à compressão do compósito com 5% de micélio em relação ao tratamento controle, além da melhoria na durabilidade, caracterizada pela redução da absorção por capilaridade e por imersão e pela menor perda de massa, indicando maior estabilidade do material frente à ação da água. Tais resultados demonstram o potencial da bioconsolidação promovida pelo micélio, contribuindo para o avanço científico no desenvolvimento de materiais construtivos sustentáveis e inovadores. Sob a perspectiva ambiental, a utilização de adobes biocompostos favorece a redução do consumo energético e das emissões de dióxido de carbono associadas à produção de materiais convencionais, além de promover o aproveitamento de recursos locais e renováveis, reduzindo impactos ambientais e incentivando práticas construtivas regenerativas. No campo social e econômico, a tecnologia desenvolvida apresenta potencial de aplicação em contextos de habitação de interesse social, autoconstrução e comunidades de baixa renda, uma vez que possibilita o uso de materiais acessíveis, de baixo custo e com menor impacto ambiental, contribuindo para a melhoria das condições habitacionais e para a geração de alternativas construtivas mais sustentáveis. O trabalho apresenta caráter extensionista ao dialogar com demandas reais da sociedade, especialmente no que se refere à construção sustentável, podendo envolver produtores locais, comunidades rurais, pequenos construtores e técnicos da área, promovendo a difusão do conhecimento técnico e científico gerado. O território de impacto abrange, principalmente, regiões com disponibilidade de solos adequados à produção de adobes, incluindo áreas rurais e periurbanas do Brasil, com potencial de beneficiar diretamente construtores, pesquisadores, estudantes e comunidades interessadas em tecnologias sustentáveis. No que se refere à participação acadêmica, o desenvolvimento da pesquisa envolveu orientação docente, com professores das áreas de engenharia de biomateriais, engenharia civil, física e biologia, com potencial de ampliação para ações extensionistas futuras envolvendo estudantes de graduação, pós-graduação e técnicos. Os impactos do trabalho enquadram-se nas áreas temáticas de Meio Ambiente e de Tecnologia e Produção, conforme a Política Nacional de Extensão, ao promover soluções tecnológicas sustentáveis aplicadas à construção civil. Ademais, a pesquisa contribui diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 9, ao incentivar inovação em materiais construtivos, o ODS 11, ao fomentar cidades e comunidades mais sustentáveis, e o ODS 12, ao promover padrões responsáveis de produção e consumo, evidenciando sua relevância científica e seu potencial de aplicação prática em diferentes contextos socioambientais.

IMPACT INDICATORS

The research presents significant impacts in the environmental, technological, social and economic dimensions by proposing the development and evaluation of biocomposites based on raw earth reinforced with mycelium, aligned with the principles of the circular economy and the guidelines of Agenda 2030. In the technological sphere, the results obtained show relevant quantitative gains, with emphasis on the 27% increase in the compressive strength of the composite with 5% mycelium in relation to the control treatment, in addition to the improvement in durability, characterized by the reduction of absorption by capillarity and by immersion and due to less mass loss, indicating greater stability of the material against the action of water. Such results demonstrate the potential of bioconsolidation promoted by mycelium, contributing to scientific advancement in the development of sustainable and innovative construction materials. From an environmental perspective, the use of biocomposite adobes favors the reduction of energy consumption and carbon dioxide emissions associated with the production of conventional materials, in addition to promoting the use of local and renewable resources, reducing environmental impacts and encouraging regenerative construction practices. In the social and economic field, the technology developed has potential for application in contexts of social housing, self-construction and low-income communities, as it enables the use of accessible, low-cost materials with a lower environmental impact, contributing to the improvement of housing conditions and the generation of more sustainable construction alternatives. The work has an extensionist nature as it dialogues with the real demands of society, especially with regard to sustainable construction, and may involve local producers, rural communities, small builders and technicians in the area, promoting the dissemination of the technical and scientific knowledge generated. The impact territory mainly covers regions with availability of soil suitable for adobe production, including rural and peri-urban areas of Brazil, with the potential to directly benefit builders, researchers, students and communities interested in sustainable technologies. With regard to academic participation, the development of the research involved teaching guidance, with professors from the areas of biomaterials engineering, civil engineering, physics and biology, with potential for expansion into future extension actions involving undergraduate, postgraduate and technical students. The impacts of the work fall within the thematic areas of Environment and Technology and Production, in accordance with the National Extension Policy, by promoting sustainable technological solutions applied to civil construction. Furthermore, research directly contributes to the Sustainable Development Goals, especially SDG 9, by encouraging innovation in construction materials, SDG 11, by promoting more sustainable cities and communities, and SDG 12, by promoting responsible production and consumption patterns, highlighting its scientific relevance and its potential for practical application in different socio-environmental contexts.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Construções com terra.....	15
2.2	O adobe como material de construção	17
2.3	Sustentabilidade em matérias de construção.....	21
2.4	Compósitos.....	23
2.5	Adição de fibras em materiais de construção	24
2.6	Micélio	25
2.7	Compósitos de micélio como material sustentável	27
2.7.1	O ligante natural	29
2.8	Inovações tecnológicas e impacto ambiental	32
2.8.1	Inovações em pesquisas acadêmicas	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Análise preliminar do solo.....	39
3.2	Origem e características físicas do solo	40
3.2.1	Granulometria do solo	41
3.2.2	Classificação granulométrica	42
3.2.3	Limites de Atterberg	44
3.2.4	Limite de Liquidez (LL)	46
3.2.5	Limite de Plasticidade (LP).....	47
3.2.5.1	Índice de Plasticidade (IP).....	48
3.2.6	Limite de Contração (LC)	48
3.2.7	Difração de Raios-X (DRX).....	49
3.3	Produção do micélio.....	51
3.4	Produção dos corpos de prova de compósitos de adobe	55
3.4.1	Definição dos tratamentos para os corpos de prova dos adobes.....	56
3.4.2	Moldagem e secagem dos adobes.....	57
3.5	Ensaio de Retração Linear	58
3.6	Características Dimensionais	60
3.7	Ensaio de Resistência Mecânica à Compressão	62
3.8	Ensaio de Absorção de água.....	66
3.8.1	Ensaio de Absorção de Água por Imersão.....	67
3.8.2	Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1	Análise granulométrica.....	71
4.2	Limites de consistência	73
4.2.1	Limite de liquidez (LL).....	73
4.2.2	Limite de plasticidade (LP)	75
4.2.3	Índice de plasticidade (IP).....	76
4.2.4	Limite de contração (LC)	76
4.3	Difração de Raios-X (DRX).....	77
4.4	Análise dimensional	79
4.4.1	Precisão experimental e pressupostos estatísticos.....	81
4.4.2	Análise de variância (ANAVA).....	81
4.4.3	Teste de comparação de médias (Tukey 5%)	82
4.5	Retração Relativa Linear Média (RRm).....	84
4.5.1	Precisão experimental e pressupostos estatísticos.....	85
4.5.2	Análise de variância (ANAVA).....	87
4.5.3	Teste de comparação de médias (Tukey 5%)	87

4.6	Resistência à compressão.....	89
4.6.1	Fundamentação técnica da análise estatística	89
4.6.2	Análise de variância (ANAVA).....	89
4.6.3	Teste de comparação de médias (Tukey 5%)	90
4.7	Absorção de água	94
4.7.1	Absorção de água por capilaridade.....	94
4.7.1.1	Análise de variância (ANAVA).....	97
4.7.1.2	Teste de comparação de médias (Tukey 5%)	98
4.7.2	Absorção de água por imersão.....	101
4.7.2.1	Análise de variância (ANAVA).....	102
4.7.2.2	Teste de comparação de médias (Tukey 5%)	103
4.8	Perda de massa em absorção de água por imersão.....	106
4.8.1	Precisão experimental e pressupostos estatísticos.....	106
4.8.2	Análise de variância (ANAVA).....	107
4.8.3	Teste de comparação de médias (Tukey 5%)	108
4.9	Análise de absorção de água - Capilaridade × Imersão	110
4.9.1	Precisão experimental e pressupostos estatísticos.....	111
4.9.2	Análise de variância (ANAVA).....	112
4.9.3	Teste de comparação de médias (Tukey 5%)	113
5	CONCLUSÃO	115
	REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

A utilização da terra como material de construção remonta a tempos antigos e persiste tanto em países desenvolvidos quanto em nações menos desenvolvidas. Estima-se que aproximadamente 30% dos locais de importância histórica sejam edificadas com materiais oriundos da terra. Além disso, entre 30% e 40% da população global reside ou trabalha em estruturas construídas com terra. Neste contexto, o tão esperado crescimento populacional mundial, previsto para ultrapassar 2 bilhões de pessoas até 2030, aliado a necessidade global de um desenvolvimento cada vez mais sustentável, intensifica sobretudo a importância de preservar ecossistemas naturais, como as construções com terra (Giaretton; Dizhur; Morris, 2021).

Em vista disso, os adobes são reconhecidos mundialmente pela sua reciclabilidade, custos de produção reduzidos e propriedades eficientes de isolamento térmico e acústico. Embora sejam necessárias aproximadamente 200 toneladas de carvão para produzir 1 milhão de tijolos cozidos, uma alternativa viável é optar por adobes brutos. Sua produção é mais ecológica e sustentável, pois elimina a fase de combustão, reduzindo significativamente as emissões de gases para a atmosfera (Vasić; Pezo; Radojević, 2020). Ademais, antes da introdução de materiais industriais, como aço e concreto, o adobe já era o principal material utilizado na construção de casas em todo o mundo.

Assim, nas últimas décadas, cada vez mais os países industrializados e em desenvolvimento tem despertado interesse pela exploração e pesquisa de materiais de construção de argila não cozida. A terra, como material construtivo, se configura como uma excelente opção para uma construção mais sustentável, já que é um elemento de fácil acesso, e, por ser natural, pode ser reutilizada múltiplas vezes. No entanto, ainda existem alguns desafios que precisam ser superados antes que o material seja amplamente utilizado para construção. O uso da terra na construção civil enfrenta limitações técnicas devido à sua insuficiente resistência mecânica, principalmente em termos de baixa resistência à tração e flexão (Dormohamadi; Rahimnia, 2020).

Para Vasić, Pezo e Radojević (2020), existem diversas desvantagens associadas à utilização de adobe, sendo sua fraca resistência à água, uma delas. No entanto, esta questão pode ser contornada com a adoção de tecnologias construtivas apropriadas. Uma delas é a proporção adequada de areia e lama, que é crucial, pois erros nesse aspecto, podem resultar em danos estruturais significativos devido à baixa resistência e à elevada taxa de expansão e retração destes materiais. A introdução excessiva de areia é outro fator preponderante que pode

promover uma redução significativa na resistência à compressão. As variações nas composições e tamanhos de suas partículas, também podem influenciar nas características físico-mecânicas, impactando, por fim, a durabilidade dos adobes.

Além disso, é comum a produção de adobes e argamassa envolver a mistura de solo com conteúdo orgânico local, sem considerar as propriedades mineralógicas do solo e as interações químicas com fibras e água. Sem dúvida, abordar o papel das fibras e do teor de água nas misturas de solo é crucial para compreender as propriedades mecânicas dos materiais, uma vez que essas características desempenham um papel fundamental na definição do adobe como um material de construção ecologicamente sustentável. Ademais, as fibras naturais podem contribuir para a melhoria das propriedades térmicas e acústicas do adobe (Piani et al., 2020).

Por esta razão, novos materiais verdes produzidos recentemente, a partir de micélio, tem surgido como uma categoria emergente de materiais acessíveis e ecologicamente sustentáveis, com diversas vantagens significativas, em relação aos tradicionais materiais sintéticos. Os destaques ficam por conta do custo reduzido, baixa densidade e consumo energético, biodegradabilidade, menor impacto ambiental e pegada de carbono em comparação a outros compósitos ditos ecológicos. Estes novos materiais apresentam potencial para revolucionar o setor da construção civil. A utilização de uma ampla gama de substratos viáveis, combinada com técnicas de processamento controladas, como o crescimento em ambiente específico e a prensagem a quente, possibilita que os materiais derivados do micélio atendam a requisitos estruturais e funcionais específicos, incluindo resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico (Jones et al., 2017).

Atualmente, um dos desafios que enfrentamos é a transição para uma economia sustentável. Até o momento, os materiais à base de micélio têm sido predominantemente derivados de fungos formadores de cogumelos, onde esses organismos colonizam seu substrato por meio de células filamentosas conhecidas como hifas, que se estendem para fora do substrato em direção ao ar, formando uma camada suave e macia, ou compacta que recobre o substrato, também conhecida como pele fúngica.

Apesar de alguns experimentos já demonstrarem a viabilidade do uso deste material para fins não estruturais em construção civil (Zhang *et al.*, 2022b), poucos estudos apontam a sua viabilidade para esse fim (Xia, 2024; Zhang *et al.*, 2023). Desta forma, é necessário o aprofundamento dos estudos das propriedades físicas e mecânicas do micélio para verificar o melhor método de produção e aplicação como material de construção para diversas finalidades.

No momento, esses novos biomateriais emergentes apresentam-se como uma alternativa promissora para o design de produtos e sua fabricação, oferecendo benefícios tanto em termos

de processos de produção sustentáveis quanto de ciclo de vida circular (Appels *et al.*, 2019). Portanto, estes materiais compósitos ligados ao micélio apresenta um grande potencial de transformar o futuro da indústria da construção civil, baseado em um novo conceito ligado a bioeconomia circular, que introduz mudanças substanciais de regras/padrões na maneira de como produzimos nossos materiais.

Considerando as limitações físico-mecânicas e a vulnerabilidade à umidade do adobe tradicional, bem como a necessidade de materiais construtivos de baixo impacto ambiental, como problema da pesquisa, questiona-se, a incorporação do micélio à matriz de adobe pode promover melhorias significativas nas propriedades físico-mecânicas e no desempenho ambiental do material, viabilizando sua aplicação em sistemas construtivos sustentáveis contemporâneos?

Nesse contexto, estabelece-se como objetivo geral desenvolver e caracterizar um biocompósito sustentável resultante da incorporação de micélio à matriz de adobe, avaliando seu potencial de aplicação na construção civil.

Para tanto, como objetivos específicos propõe-se: desenvolver formulações experimentais de biocompósitos adobe-micélio; investigar as propriedades físico-mecânicas dos corpos de prova de adobe; comparar o desempenho dos biocompósitos, produzidos com diferentes teores de micélio, especificamente 2% e 5%, e com caldo de batata, a fim de compreender a influência da variação da fração biológica no comportamento do material.

Parte-se da hipótese de que a incorporação controlada de micélio à matriz de adobe promove aumento na coesão interna do compósito, melhoria na resistência mecânica e redução da absorção hídrica, sem comprometer sua sustentabilidade ambiental, reforçando seu potencial como alternativa construtiva de baixo impacto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Construções com terra

Utilizando como matéria prima em construções, a terra vem desde muito tempo ocupando lugar de destaque no cenário mundial, principalmente em regiões de climas quentes, áridos ou temperados, projetando a história e cultura de várias populações. Para tanto, as primeiras construções com seu uso, são datadas com cerca de nove mil anos, na região do Médio-Oriente. Na região da Anatólia, sítios como Göbekli Tepe revelaram construções monumentais datadas entre 9600 e 8200 a.C., consideradas as mais antigas estruturas conhecidas do mundo (UNESCO, 2018). Além deste relato, merecem destaques as civilizações do antigo Egito, gregas e romanas, bem como os povos da América Andina, Central e Latina. São exemplos de civilizações que utilizaram a terra como material de construção ao longo de milênios em residências, fortalezas e obras religiosas. As ruínas do templo mortuário de Ramsés II e Gourná, Egito, construído com adobe há mais de três mil anos, também merecem destaque (Minke, 2015).

Neste contexto, conforme Neves *et al.*, (2009), existem diversas técnicas construtivas em terra aplicadas em diferentes regiões do mundo. No Brasil, destacam-se o adobe, o pau a pique, a taipa de pilão e o bloco de terra comprimida, sendo este o método mais recente. O solo utilizado para adobe e pau a pique, por conter maior quantidade de água, forma uma massa plástica (barro) empregada na moldagem. Já a taipa de pilão e os blocos de terra comprimida requerem uma mistura úmida, próxima da condição seca, adequada à prensagem ou compactação. Para esta última técnica, os autores ressaltam que as propriedades mecânicas e a impermeabilidade são substancialmente superiores.

Entre os sistemas construtivos adotados no Brasil, a técnica da taipa (Figura 1) foi amplamente utilizada no período colonial, conforme Cordeiro, Meneguetti e Hardt (2019). Essa técnica se destacou principalmente em áreas com escassez de pedra como material de construção. Seu emprego iniciou-se no estado de São Paulo e, posteriormente, expandiu-se para a Bahia, incluindo Salvador, bem como para Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso e Goiás. Em Goiás, mostrou-se eficiente; entretanto, em Minas Gerais foi substituída por métodos como taipa de mão e adobe, devido à inadequação à topografia local (Peixoto; Souza; Rezende, 2016).

Figura 1 – Taipa de mão.



Fonte: Sienge, 2020.

No início do século XIX, os impactos da Revolução Industrial, somados à transferência da Corte portuguesa para o Brasil, desencadearam profundas transformações no território nacional. Ao longo dos séculos XIX e XX, esse contexto promoveu mudanças graduais nas práticas construtivas, culminando na substituição dos sistemas baseados em terra por alternativas mais modernas, como a alvenaria de tijolos cerâmicos. A taipa de pilão, que já apresentava uso reduzido, praticamente desapareceu, enquanto o adobe e o pau-a-pique permaneceram na construção de moradias em diferentes regiões do país (Rezende; Lopes, 2022).

A partir da década de 1960, em meio ao fortalecimento do movimento ambientalista e à valorização de tecnologias tradicionais, observou-se um crescente resgate das técnicas construtivas com terra, um material acessível, de baixo impacto ambiental, biodegradável, versátil e abundante. Nesse cenário, profissionais, instituições e empresas passaram a se dedicar ao aprimoramento desses processos construtivos. A Figura 2 mostra esse processo, buscando adequá-lo às demandas contemporâneas do setor da construção civil (Caldas; Martins; Toledo Filho, 2021).

Figura 2 – Parede de pau a pique.



Fonte: Müller, 2020.

No entanto, a falta de conhecimento técnico para escolha adequada do solo, pode ocasionar a produção de adobes com baixa resistência à compressão, favorecendo interpretações equivocadas que transmitem à população a ideia de fragilidade e precariedade (Rao, 2024). No entanto, Paula, Miguel e Freitas (2020), relata que algumas cidades históricas possuem construções antigas e bem preservadas, e, atualmente, cidades como Tiradentes e o Distrito Vitoriano Veloso, conhecido como Bichinho, ambos no Estado de Minas Gerais, são exemplos de regiões que ainda utilizam o adobe como material construtivo.

2.2 O adobe como material de construção

As técnicas de construção com argila apresentam uma longa história de cerca de 9.000 anos, sendo certificadas ao longo do tempo. O adobe, por exemplo, já era utilizado no Turquestão por volta de 8.000 a 6.000 a.C. Já a Austrália, foi o primeiro país a regulamentar construções feitas de terra, o que ocorreu em 1952. Na Romênia, a popularidade das casas naturais e ecológicas vem crescendo e despertando o interesse de especialistas nesse tipo de construção e em outros produtos associados a ela (Calatan *et al.*, 2020).

Neste sentido, a alvenaria de adobe e tijolo de barro representam formas tradicionais de construção não reforçada, sendo utilizada desde a antiguidade na edificação de estruturas e infraestruturas ao redor do mundo. Estima-se que aproximadamente 30-50% da população mundial, equivalente a cerca de 3 bilhões de pessoas, vive ou trabalha em estruturas de terra não cozidas. Tanto a alvenaria de adobe quanto os tijolos de barro são métodos construtivos comuns em zonas rurais e urbanas, inclusive em regiões que apresentam elevado risco sísmico (Caporale *et al.*, 2015). A Figura 3 mostra uma construção que se utilizou do adobe em sua estrutura.

Figura 3 – Construção de adobe na cidade de Sana'a no Iêmen.



Fonte: Long, 2025.

Os materiais de construção representam um componente fundamental no setor construtivo e devem ser analisados com rigor durante processos de renovação e implementação. Assim, para tornar o adobe menos vulnerável às condições ambientais, considerando sua sensibilidade à água e à ação do tempo, inúmeros pesquisadores têm desenvolvido melhorias na técnica tradicional. Como resultado, surge o adobe produzido com argila reciclada, uma versão aperfeiçoada do modelo convencional, que busca recriar materiais orgânicos para atender às demandas do mercado atual (Kumanan; Sofi, 2023).

Sem dúvida, o adobe têm sido amplamente empregado na construção devido ao custo acessível, bom desempenho e à facilidade de montagem e elaboração desses elementos nas estruturas. Contudo, a baixa ductilidade e resistência à compressão do adobe podem comprometer o comportamento estrutural de edificações, especialmente aquelas de maior altura. Estudos indicam que a incorporação de fibras naturais em materiais terrosos pode

melhorar o comportamento mecânico e a durabilidade do adobe, reduzindo fissuração e aumentando a resistência estrutural dependendo do teor e do tipo de fibra utilizada (Bas *et al.*, 2020; Eslami; Mohammadi; Mirabi Banadaki, 2022).

Constata-se que os adobes são frequentemente produzidos com matérias-primas selecionadas de forma não sistemática e mediante técnicas empíricas, enquanto os fabricantes carecem de conhecimento sobre regulamentações e normas essenciais à qualidade e aos detalhes da produção (Castrillo; Ioannou; Philokyprou, 2021). Simultaneamente, observa-se uma demanda crescente por materiais construtivos de origem biológica, incluindo a adição de agregados vegetais em tijolos de barro.

Nesse sentido, a arquitetura de terra apresenta-se como alternativa técnica para enfrentar desafios ambientais, sociais e de saúde inerentes à arquitetura contemporânea. A abundância de solo bruto sobressai pela acessibilidade, capacidade de reutilização e papel relevante na proteção contra umidade e no controle térmico. Adicionalmente, essa abordagem contribui para a preservação dos recursos naturais, a redução do consumo energético e a minimização do uso de cimento, reduzindo, assim, as emissões de CO₂ (Saliba *et al.*, 2023).

Como solução complementar, fibras naturais vêm sendo aplicadas em sistemas construtivos de terra para aprimorar a ductilidade, a resistência à tração e pós-fissuração, a resistência à erosão e a estabilidade dimensional, além de mitigar fissuras ocasionadas pelo encolhimento do material (Kafodya; Okonta; Kloukinas, 2019). Além disso, os materiais de construção de barro frequentemente enfrentam o desafio de rachaduras devido a deformações excessivas por retração durante a secagem, resultantes do alto teor de partículas finas. A adição de materiais fibrosos pode ser benéfica não apenas para reduzir a formação de fissuras, mas também para aprimorar o desempenho mecânico. Essas fibras geralmente são provenientes de recursos locais ou subprodutos, como fibras extraídas de produtos vegetais. Vários estudos também comprovaram que fibras sintéticas, com baixo módulo, provenientes de materiais virgens ou residuais, podem ser eficazes na melhoria de diversas propriedades de tijolos de adobe e outros materiais de barro (Bertelsen *et al.*, 2021).

Neste cenário, pesquisas recentes apontam as limitações dos materiais de construção à base de barro em relação ao concreto e às unidades de alvenaria, destacando sua menor resistência à tração e à compressão, o que os torna frágeis e menos resilientes a danos. Para superar essas restrições, diversas técnicas têm sido sugeridas, como a estabilização do solo por meio de agentes químicos ou ligantes, incluindo cimento, cal e betume. Além disso, o processo de fabricação de blocos de terra compactados prevê a incorporação de fibras naturais e sintéticas à matriz do solo, podendo, em alguns casos, associar diferentes métodos na produção de tijolos

e blocos. Essas abordagens têm como objetivo principal aprimorar as propriedades de engenharia dos materiais terrosos utilizados na construção (Ige; Danso, 2021).

Segundo Ige e Danso (2021), fibras naturais representam um material estabilizador de baixo custo altamente desejável para tijolos de solo, sendo também, subprodutos agrícolas de base biológica, renováveis e neutros em carbono. Assim, a integração de um material de base biológica, como a palha, em combinação com o barro, pode ser aplicada de maneira lucrativa na construção de edifícios. Isso se deve à capacidade desses materiais de reduzir a transferência de calor e regular as variações de umidade no interior. Sem dúvida, a utilização de subprodutos agrícolas, caracterizados como materiais ecológicos, para aprimorar as propriedades ligadas a engenharia dos materiais de construção de barro, é uma ideia bem-vinda em resposta à crescente demanda por materiais sustentáveis na atualidade. Suas numerosas vantagens tornam esses materiais atraentes, especialmente em países em desenvolvimento, onde a construção de edifícios usando fibras naturais com blocos de adobe é alcançada a um custo bastante reduzido.

Considerando que a terra crua é o componente mais ecologicamente sustentável tradicionalmente utilizado na fabricação de tijolos, a combinação de resíduos lignocelulósicos com matriz argilosa emerge como uma prática potencialmente significativa para a tornar a indústria da construção civil mais ecológica. Os resultados da literatura destacam a eficácia das fibras na redução da fissuração durante o processo de secagem de tijolos não cozidos e na otimização de suas propriedades de transporte térmico. No entanto, é imperativo a realização de mais pesquisas nessa direção, explorando novos aditivos locais para desenvolver tijolos que sejam tanto de alto desempenho quanto acessíveis em termos de custo-benefício (Charai *et al.*, 2022).

Isto posto, fica claro que a exploração de técnicas de reforço apropriadas para aprimorar o desempenho sísmico da alvenaria de adobe, é cada vez mais necessário. Geralmente, dois métodos de reforço são amplamente utilizados em paredes de alvenaria: técnicas externas (EB), que consiste em aplicar materiais de reforço diretamente na superfície da parede de adobe, e técnicas (NSM), com inserção de elementos de reforço próximo à superfície da parede. Nesse sentido, a melhoria do desempenho da ligação entre o material de reforço e a alvenaria de adobe pode ser alcançada por meio da criação de furos na parede para conectar os materiais de reforço em ambos os lados. Pesquisas indicam que esse método pode eficazmente evitar o desprendimento de materiais de reforço, aprimorar o desempenho sísmico da estrutura de adobe e ampliar as possibilidades de aplicação do método EB. Além disso, o esquema de fortalecimento é de fácil implementação, não exigindo trabalhadores qualificados na construção, com custo de materiais acessível, sendo compatível com os custos associados à

alvenaria de adobe. Adicionalmente, o esquema pode ser aplicado tanto em edifícios de adobe já existentes quanto em novas construções (Zhang *et al.*, 2023).

No contexto dos materiais de construção, é imprescindível obter conhecimento experimental que possibilite estimar os valores esperados das propriedades mecânicas. Além disso, destaca-se a necessidade de desenvolver modelos numéricos aplicáveis à prática, voltados ao projeto estrutural de novas edificações. Tais modelos devem prever a resposta do material e fornecer diretrizes para a conservação de estruturas já existentes (Fages *et al.*, 2022).

Por fim, explorar o uso da terra crua na construção civil revela-se essencial para impulsionar a economia circular. Os tijolos de adobe constituem materiais de elevada robustez, produzidos a partir de solo seco, resultante da combinação de areia e argila em proporções variadas. Tal prática contribui para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, promover a engenharia sustentável, estimular pesquisas sobre adobe e fortalecer os segmentos profissional e industrial em resposta às necessidades contemporâneas.

2.3 Sustentabilidade em materiais de construção

A construção civil constitui atualmente um dos principais temas nas discussões sobre sustentabilidade, devido à elevada geração de resíduos e à significativa extração de matérias-primas da natureza. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), esse setor é responsável por cerca de 31 milhões de toneladas de resíduos anualmente (Fernandez, 2012).

O tema da sustentabilidade, tanto na sociedade quanto nos meios de produção, tem sido amplamente discutido, despertando crescente interesse entre pesquisadores e cidadãos. Ao contrário do tijolo cerâmico, o adobe não passa pelo processo de queima, sendo sua secagem geralmente realizada por exposição ao sol (Figura 4). Essa característica confere ao adobe maior sustentabilidade em relação às construções tradicionais que utilizam concreto e blocos de alvenaria, visto que os adobes podem apresentar longa durabilidade e são totalmente recicláveis (Minke, 2015).

Figura 4 – Adobe em processo de secagem ao sol.



Fonte: Mobuss Construção, 2020.

Quando comparada aos métodos construtivos que utilizam materiais industrializados, a técnica em adobe sobressai pelo maior controle da temperatura e da umidade interna, pelo baixo custo e pela elevada sustentabilidade. Essas propriedades estão associadas à elevada massa específica dos materiais terrosos, que contribui para maior inércia térmica e para a regulação das trocas de umidade no ambiente construído (Olacia *et al.*, 2020).

Entre seus atributos positivos, o adobe é reciclável, poroso e permeável, podendo ser considerado um material que contribui para o conforto térmico da edificação. Além disso, atua como filtro de ar, favorecendo sua renovação e regulando a umidade entre os ambientes interno e externo (Calabria; Vasconcelos; Boccaccini, 2009).

Neste contexto, Costa *et al.*, (2019) apresentaram uma síntese histórica sobre o uso do adobe ao longo dos anos, evidenciando que sua aplicação não se restringe a países subdesenvolvidos, mas também ocorre em nações desenvolvidas, como Portugal, Alemanha, França e Inglaterra. Os autores ressaltam que esses países demonstram preocupação com a conservação do patrimônio histórico e indicam os geopolímeros como alternativa sustentável, para aprimorar o desempenho do adobe, atuando na estabilização e no fortalecimento da matriz argilosa.

Esse modo de edificação em terra enquadra-se no conceito de construção vernacular, que se caracteriza pela utilização de materiais locais e técnicas tradicionais para criar edificações adaptadas à cultura, ao clima e às condições geográficas de determinada região, sendo práticas transmitidas entre gerações. Como principais benefícios, apresentam maior

sustentabilidade e conforto térmico em relação às construções realizadas com materiais industrializados (Weber; Yannas, 2014).

2.4 Compósitos

De maneira geral, um material é caracterizado como compósito quando é formado por dois ou mais constituintes (fases) diferentes. Atualmente, a implementação de compósitos surge da necessidade de alternativas às demandas tecnologias do mercado, que possam substituir o uso das ligas metálicas, cerâmicas e poliméricas atualmente utilizada. (Bhong *et al.*, 2023).

O principal objetivo na produção de compósitos é combinar diferentes materiais de modo a obter um único material com propriedades superiores às de cada componente individual. Assim, a escolha dos materiais constituintes é orientada pela aplicação específica desejada para o compósito, uma vez que a combinação de uma matriz e reforços distintos pode resultar em melhorias significativas nas propriedades mecânicas e funcionais do material final (Adishesan; Omkumar, 2024). A Figura 5 representa o processo de produção de um compósito.

Figura 5 – Processo de produção de um compósito.



Fonte: Fibrenamics, 2025.

Assim, esses materiais apresentam propriedades únicas e sinérgicas, distintas daquelas de cada componente isolado. A combinação dos materiais tem como objetivo conferir características específicas ao compósito, de acordo com a sua aplicação (Ligowski; Santos; Fujiwara; 2015; Neto; Pardini, 2021).

Em síntese, os compósitos são classificados como naturais ou sintéticos. No caso dos compósitos sintéticos, é possível estabelecer diversas subclassificações, que variam conforme o tipo de matriz, o arranjo da fase dispersa e as características do reforço (Neto; Pardini, 2021).

A utilização de fibras vegetais em materiais compósitos apresenta-se como uma solução promissora para mitigar os impactos ambientais significativos gerados pela construção civil.

Nesse contexto, estudos que abordam o emprego dessas fibras em compósitos são relevantes, embora ainda careçam de aprofundamento (Barros *et al.*, 2023).

2.5 Adição de fibras em materiais de construção

O emprego de fibras na construção civil teve maior destaque a partir do século XX, especialmente com o uso do cimento-amianto, material composto pela mistura de cimento e fibras de amianto, produzido pelo método Hatschek. Atualmente, observa-se a utilização de fibras vegetais, artificiais e sintéticas (Figura 6). Entre as fibras naturais e sintéticas mais comuns destacam-se as de coco, sisal, piaçava, polpa de algodão, celulose de eucalipto, rami, banana, malva, além de polipropileno, aço, vidro, nylon, poliéster, carbono, celulose e amianto (Freire, 2003).

Figura 6 – Fibras naturais e sintéticas.



Fonte: Autora, 2026.

Estudos demonstram que a incorporação de fibras vegetais reduz os efeitos da retração. A adição de azeites e emulsões asfálticas diminui a permeabilidade, contribuindo para maior durabilidade das construções. A utilização de aglomerantes como cimento e cal, por sua vez, pode aumentar significativamente a resistência mecânica da terra comprimida (Neves *et al.*, 2009).

Contudo, o uso de cimento e cal como estabilizantes para sistemas construtivos em terra, embora comum, pode elevar a energia incorporada da técnica, conforme apontado por Losini *et al.*, (2023). Estudos também têm avaliado a adição de resíduos industriais, que se apresentam como alternativa viável para a estabilização de adobes (Olacia *et al.*, 2020).

É importante destacar que o adobe pode ser produzido apenas com terra. No entanto, as características do solo podem ser aprimoradas por meio de processos de estabilização, nos quais

são adicionados determinados materiais com o objetivo de melhorar propriedades como resistência mecânica, durabilidade e comportamento frente à umidade (Santos; Bessa, 2020).

Nos adobes tradicionais, a palha é frequentemente incorporada para melhoria da ductilidade. Embora essa característica seja aprimorada, os ganhos em resistência são modestos. Ademais, devido à sua forma lamelar, a palha apresenta aderência limitada à matriz de terra. No Nordeste brasileiro, há ampla disponibilidade de fibras vegetais como sisal, coco e bananeira, que podem ser cortadas em diferentes comprimentos e, com relações comprimento/diâmetro adequadas, promovem melhor aderência e aprimoram a qualidade do adobe. Estudos mostram que a incorporação de fibras naturais como coco na matriz de terra pode melhorar significativamente o comportamento mecânico dos blocos de adobe e influenciar parâmetros de absorção de água (Da Silva *et al.*, 2024).

Kafodya, Okonta e Kloukinas (2019) investigaram a influência da adição de fibras de sisal em adobes e argamassas de argila. Foram construídas paredes com esses materiais e realizados ensaios de compressão uniaxial e cisalhamento diagonal. Os resultados mostraram melhorias significativas no desempenho mecânico, com aumento de 31% na resistência à tração da argamassa e 25% na resistência à compressão do adobe.

Piani *et al.*, (2020) analisaram a influência de fibras vegetais e da presença de água no comportamento dinâmico de adobes. Os autores observaram que maiores concentrações de fibras tornam o material mais heterogêneo e ampliam as áreas suscetíveis a falhas. Quanto ao teor de umidade, verificou-se que o melhor desempenho ocorreu em adobes completamente secos de forma natural, devido à formação de ligações químicas mais fortes e arranjo interpartículas mais denso.

2.6 Micélio

O micélio representa a porção vegetativa de um fungo, caracterizado pelo seu crescimento rápido, renovável e seguro. Se desenvolve na forma de uma massa de fibras ramificadas, ancorando-se ao substrato no qual é cultivado (Figura 7). O substrato pode ser composto por resíduos agrícolas ou qualquer material capaz de fornecer os nutrientes necessários para o crescimento do micélio (Sivaprasad *et al.*, 2021). Dessa forma, uma notável diversidade desses fungos formadores de cogumelos coloniza habitats terrestres ao estabelecer redes miceliais. Diferentemente das leveduras, que se desenvolvem como organismos unicelulares, os fungos filamentosos (cogumelos) crescem vegetativamente, enquanto os micélios se ramificam e se entrelaçam para formar redes miceliais subterrâneas (Jo *et al.*, 2023).

Figura 7 – Micélio ramificado ao substrato.



Fonte: Adapt, 2025.

Nesse sentido, a parede celular do micélio é predominantemente composta por quitina, glucanos, proteínas e lipídios, cujas concentrações variam conforme o substrato de alimentação, definindo, em última instância, as características finais dos materiais sintetizados. Esses materiais, puros ou compostos, derivados do micélio, exibem rigidez, elasticidade, porosidade, leveza, rápido crescimento e economicamente viáveis. Além disso, possuem eficazes propriedades antimicrobianas, antioxidantes e de clareamento da pele, tornando-os aplicáveis em diversos setores, como construção, embalagem, medicamentos e cosméticos (Manan *et al.*, 2021).

O material de micélio representa uma inovação que combina fungos filamentosos e subprodutos residuais agrícolas, constituindo um valioso recurso natural renovável que tem despertado grande interesse na indústria e na comunidade científica. Esses biocompósitos de micélio (Figura 8) são desenvolvidos através da inoculação de fungos no substrato vegetal, predominantemente composto por ervas, plantas lenhosas ou resíduos agrícolas. A peculiaridade do crescimento do micélio é explorada, conforme se expande internamente, unindo as fibras do substrato como uma espécie de cola natural. Além disso, se desenvolve externamente, formando uma camada densa de pele fúngica que oferece proteção, resultando na criação de uma estrutura orgânica coesa durante o processo de cultivo (Peng *et al.*, 2023).

Figura 8 – Biocompósito de micélio.



Fonte: Souza, 2020.

Desta forma, o tipo de substrato utilizado para o crescimento do micélio é um fator importante que contribui para as propriedades do material. Os substratos com fibras naturais intactas conferem características de endurecimento por deformação aos materiais à base de micélio, proporcionando resistência e evitando falhas por cisalhamento. Assim, a natureza do substrato também influencia a inflamação dos compósitos fúngicos. Por exemplo, a lignina diminui a combustão à medida que seus anéis cíclicos são decompostos em fragmentos aromáticos que constituem os principais componentes do carvão, enquanto a celulose favorece a combustão (Manan *et al.*, 2021).

Em seus estudos acerca de novos materiais naturais, Haneef *et al.*, (2017), apresenta uma nova categoria de materiais compósitos naturais, autossustentáveis, produzidos a partir de micélio, com propriedades físicas ajustáveis conforme o substrato de alimentação (celulose ou celulose/dextrose). Ele demonstra que materiais cultivados em celulose possuem maior teor de quitina, maior módulo de Young e menor alongamento, indicando maior rigidez quando o substrato é de difícil digestão.

2.7 Compósitos de micélio como material sustentável

A busca por produtos e tecnologias ecologicamente sustentáveis para aplicações no ambiente construído deu origem a uma nova geração de materiais sustentáveis, incluindo os compósitos à base de micélio. Esses biocompósitos resultam do crescimento das partes filamentosas do fungo em um substrato orgânico. Sua notável combinação de custos reduzidos

de energia e processamento, biodegradabilidade e uma variedade atraente de propriedades os posicionou como materiais alternativos altamente solicitados no setor da construção (Alaneme *et al.*, 2023).

O micélio fúngico destaca-se pelo excelente desempenho térmico e pela biodegradabilidade, configurando-se como alternativa atrativa para a produção de isolamentos em edificações. A eficiência energética desse isolamento, aplicado em diferentes zonas climáticas, pode ser avaliada utilizando diversos softwares para análise do desempenho energético.

Neste sentido os pesquisadores Zhang *et al.*, (2022b), investigando acerca de isolantes térmicos inovadores, produzido a partir do cultivo do fungo *Pleurotus ostreatus* em bagas de centeio, formando compósitos de micélio com propriedades térmicas e mecânicas ajustáveis, comparou os resultados de desempenho energético, àqueles obtidos junto a isolantes convencionais de LECA e vermiculita, utilizando o software EnergyPlu. Os resultados indicaram redução nas flutuações de temperatura interna, menor consumo anual de energia para aquecimento e resfriamento e redução das emissões de CO₂ em zonas climáticas dos EUA (exceto zonas muito quentes), evidenciando o potencial do micélio como isolante sustentável. A figura 9 mostra um exemplo de isolamento térmico, onde o material isolante é produzido de micélio entrelaçado, cultivado em resíduo agrícola.

Figura 9 - Isolamento rígido da Ecovative Design feito de micélio.



Fonte: Upcycling Solutions, 2022.

Os compósitos de micélio consistem em partículas lignocelulósicas unidas pelo micélio de fungos formadores de hifas, apresentando propriedades físico-mecânicas semelhantes às de compósitos expandidos de poliestireno, com a vantagem de serem totalmente compostáveis. O

baixo custo de fabricação torna esses materiais uma alternativa promissora aos plásticos, contribuindo para uma economia circular e sustentável. Um resíduo adequado para esse processo é o bagaço de Guayule, arbusto do deserto utilizado na extração de borracha natural, cujos componentes ricos em polissacarídeos e lignina favorecem o crescimento micelial (César *et al.*, 2023).

Outro fator relevante é o tamanho dos fragmentos de micélio, pois unidades menores apresentam melhor desempenho, maior controle no crescimento e menor risco de contaminação. A porosidade e a composição do material dificultam a produção de grandes blocos contínuos, direcionando as aplicações para elementos de pequena escala, como módulos ou componentes finos. Em aplicações arquitetônicas, espera-se que esses produtos sejam utilizados preferencialmente em sistemas modulares, considerando aspectos como geometria, espessura, estratégias de intertravamento e tempo de crescimento. Um sistema de intertravamento funcional é essencial para a montagem eficiente de módulos compostos exclusivamente por micélio (Abdelhady; Spyridonos; Dahy, 2023).

Nesse contexto, de acordo com Girometta *et al.*, (2019) uma característica singular dos compósitos à base de micélio reside na ampla diversidade de propriedades técnicas e estéticas que podem ser alcançadas por meio de variações mínimas no processo de fabricação, tais como as cepas de substrato ou fungos empregados. A variedade de métodos no processo produtivo de biocompósitos fúngicos está essencialmente vinculada à colonização de um substrato que é moldado contemporânea ou posteriormente ao crescimento micelial.

Dentro dessa categorização rigorosa, destacam-se os compósitos à base de micélio, como as espumas e os compósitos sanduíche. As espumas à base de micélio são materiais de baixa densidade que surgem da colonização de um substrato lignocelulósico pelo fungo. Por sua vez, os compósitos sanduíche são caracterizados por uma estrutura com andaimes, onde as camadas externas são unidas devido à ação adesiva do micélio que se desenvolve no material principal (Girometta *et al.*, 2019).

2.7.1 O ligante natural

Outro ponto relevante em aplicações com micélios, é que o organismo em si representa um componente vital desses materiais compósitos, não apenas devido aos seus componentes celulares que incorporam propriedades únicas, mas também devido ao seu comportamento durante o processo de crescimento. Ele desempenha um papel crucial na auto montagem, atuando como uma "cola natural" e eliminando a necessidade de ligantes de polímeros

termoplásticos derivados de fósseis. O processo de produção completo é reconhecido por sua amigabilidade ambiental, pois valoriza os fluxos de resíduos, evitando assim a degradação dos ecossistemas por meio da mineração de recursos (Elsacker *et al.*, 2020).

Dada a rápida taxa de crescimento do micélio, suas necessidades limitadas de irrigação, sua habilidade em consumir e aproveitar resíduos vegetais, bem como suas propriedades mecânicas e estéticas singulares, a sua incorporação em cadeias de valor industriais pode representar uma solução essencial para aprimorar os padrões de ciclo de vida de produtos futuros. Uma pesquisa preliminar indicou que os resíduos agrícolas provenientes da poda de videiras e maçãs são os mais compatíveis com todas as espécies fúngicas testadas. Além disso, sugeriu-se que, para avaliar de maneira mais precisa a compatibilidade de cada par de substrato e fungo para aplicações mais específicas, métodos de avaliação analítica, como testes físico-mecânicos, devem ser empregados (Attias *et al.*, 2020).

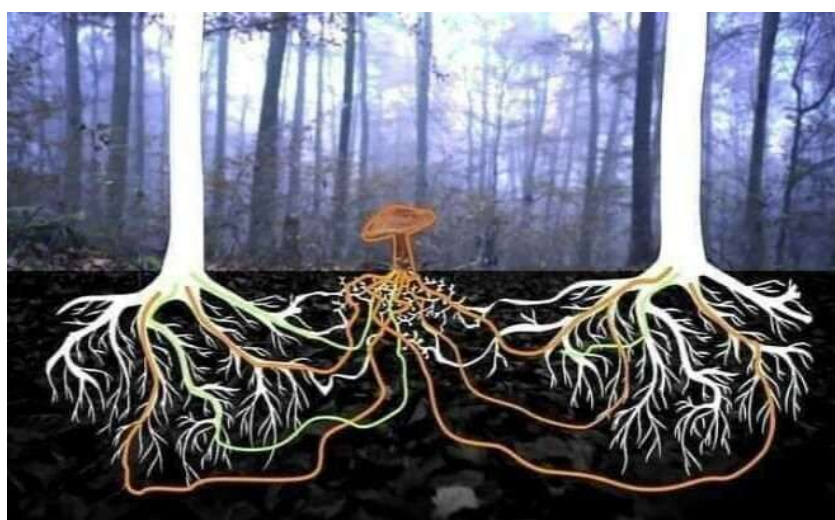
Ainda em tempo, o micélio é predominantemente composto por polímeros naturais, como quitina, celulose, proteínas, entre outros, tornando-se um material fibroso de composição polimérica natural. Em pesquisas, observou-se a obtenção de filmes fibrosos cuidadosamente projetados com propriedades ajustáveis por meio da combinação de micélio com substratos à base de polissacarídeos de diferentes composições. Duas espécies de fungos medicinais comestíveis, *Ganoderma lucidum* e *Pleurotus ostreatus*, ambas pertencentes ao grupo dos fungos da podridão branca, foram empregadas. Essas espécies têm a capacidade de excretar uma variedade de enzimas, algumas das quais são capazes de degradar componentes vegetais desafiadores de hidrolisar, como a lignina. Importante destacar que a escolha dessas espécies foi baseada no fato de poderem secretar enzimas semelhantes, possibilitando a decomposição dos mesmos substratos e o desenvolvimento de estruturas filamentosas entrelaçadas (Haneef *et al.*, 2017).

De acordo com Haneef *et al.*, (2017) os micélios exercem a penetração em seus substratos de alimentação por meio de pressão física e secreção enzimática, buscando decompor os polímeros biológicos em nutrientes facilmente absorvidos e transportados, como os açúcares. Devido à natureza polissacarídica compartilhada pelos dois substratos de alimentação, é esperado que o micélio utilize enzimas fúngicas semelhantes para realizar sua hidrólise. Além disso, graças ao seu método de desenvolvimento, ambos os substratos são notavelmente homogêneos, apresentando superfícies regulares. Esse fato assegura que o processo de crescimento do micélio ocorra em uma plataforma de nutrição invariável, resultando na obtenção de materiais uniformes. Esses dois substratos de alimentação são considerados ideais para evidenciar a capacidade dos materiais fibrosos desenvolvidos de ajustar suas propriedades

em função do substrato de alimentação, podendo servir como referência para substratos mais complexos.

Ainda sobre o processo de crescimento do micélio, essa estrutura vegetativa de fungos utiliza de enzimas fúngicas que são compostas por hifas que crescem nas extremidades e se ramificam sub-apicalmente. A pressão interna do turgor, aliada às paredes celulares rígidas, possibilita que as hifas penetrem em materiais orgânicos, como resíduos de plantas. As enzimas secretadas desempenham a função de degradar os polímeros presentes no substrato em moléculas absorvíveis, que servirão como nutrientes. Destaca-se que a micélio fúngica tem a capacidade de cobrir extensas áreas, especialmente aquelas associadas a fungos que desenvolvem cogumelos (Appels *et al.*, 2018). Na Figura 10, é possível observar como esse tipo de micélio se desenvolve através do substrato, penetrando na matéria orgânica.

Figura 10 – Micélio colonizando o substrato.



Fonte: Nucci, 2021.

Os compósitos de micélio constituem uma classe emergente de materiais caracterizados pelo baixo custo e pela elevada sustentabilidade ambiental, despertando crescente interesse na comunidade científica. Esses materiais utilizam o crescimento controlado de fungos como método de biofabricação de baixa demanda energética, possibilitando a reciclagem de subprodutos agrícolas e resíduos em alternativas mais sustentáveis aos materiais sintéticos tradicionalmente empregados na construção civil, os quais são intensivos em energia. Além das vantagens relacionadas ao custo reduzido, simplicidade de produção e menor impacto ambiental, as propriedades funcionais dos compósitos de micélio indicam seu potencial para desempenhar papel relevante no avanço da construção sustentável (Alemu; Tafesse; Mondal, 2022).

Entretanto, a literatura técnica especializada apresenta informações fragmentadas sobre o tema. As metodologias adotadas nos estudos existentes são heterogêneas, carecendo de padronização e de análises comparativas dos parâmetros de produção e das propriedades mecânicas desses compósitos.

No contexto da aplicação como material de construção, observa-se a ausência de pesquisas voltadas à avaliação de normas técnicas. Essa lacuna representa um desafio significativo, tornando imprescindível a elaboração de diretrizes uniformes para viabilizar a implementação em larga escala (Elsacker *et al.*, 2020).

2.8 Inovações tecnológicas e impacto ambiental

Atualmente, as construções em terra, frequentemente associadas a bioconstrução, configuram-se como uma alternativa aos métodos tradicionais. Segundo Oliveira *et al.*, (2016), esse tipo de construção caracteriza-se pelo uso de materiais naturais de baixo impacto ambiental, devido ao modo como são produzidos, a sua relação equilibrada com o meio e a adequação as condições climáticas locais, além de gerar reduzida quantidade de resíduos.

Com o avanço acelerado da urbanização, que promoveu o adensamento das cidades e intensificou as atividades do setor da construção civil, observou-se também um aumento expressivo na exploração de recursos naturais e na produção de resíduos da construção e demolição (RCD). Esses resíduos (Figura 11), resultantes de desperdícios em obras, reformas e demolições, atingiram patamares preocupantes, enquanto países desenvolvidos registram valores médios inferiores a 100 kg/m², no Brasil o índice chega a aproximadamente 300 kg/m² (Monteiro *et al.*, 2001). A ausência de um adequado gerenciamento desses materiais impacta negativamente as cidades sob os aspectos sociais, econômicos e ambientais (Brasileiro; Matos, 2015).

Figura 11 – Resíduo na construção civil.



Fonte: Falcão, 2024.

A ampliação da divulgação dos impactos ambientais, aliada ao fortalecimento dos movimentos ecológicos, tem levado as organizações a reavaliarem seus processos produtivos, reconhecendo a necessidade de aprimorar o desempenho ambiental. Nesse contexto, observa-se a adoção de tecnologias mais limpas e práticas sustentáveis como estratégia para elevar a competitividade empresarial (Serra *et al.*, 2006).

Embora seja uma das atividades industriais mais relevantes para o desenvolvimento socioeconômico, a construção civil é também um dos setores que mais contribuem para a degradação ambiental, devido ao elevado consumo de energia e de recursos naturais. A extração inadequada de materiais finitos tende à escassez, e estima-se que a cadeia produtiva da construção civil utilize entre 20% e 50% de todos os recursos naturais do planeta (Santos *et al.*, 2011). Além disso, o setor é responsável por grandes volumes de resíduos, frequentemente descartados de forma irregular. Por essa razão, órgãos reguladores mantêm constante atenção ao uso excessivo de matérias-primas, incentivando o desenvolvimento de tecnologias que promovam economia e reutilização de materiais (Elroi *et al.*, 2023).

Dentre as estratégias de mitigação dos impactos ambientais, a reciclagem destaca-se como uma alternativa viável. Essa prática contribui para reduzir o consumo de matéria-prima, minimizar a geração desordenada de resíduos e sanar problemas associados, como a sobrecarga de aterros sanitários, a proliferação de pontos clandestinos de descarte e o aumento dos custos de gerenciamento de resíduos (Brasileiro; Matos, 2015).

Em um contexto mais amplo, os fungos, em conjunto com a biomassa vegetal, têm despertado interesse tanto na indústria quanto na comunidade científica como um recurso

natural renovável de valor inestimável. Uma ampla gama de aplicações industriais para os fungos tem sido proposta e implementada: tecidos fúngicos são utilizados como materiais compósitos, enquanto suas enzimas são empregadas na modificação da biomassa. Desta forma, na composição dos compósitos, o micélio é considerado uma matriz de suporte que interliga partículas de plantas dentro de sua estrutura filamentosa. A taxa de crescimento das hifas e a densidade do micélio foram identificadas como fatores cruciais na escolha de espécies fúngicas para a produção de compósitos de micélio (Kuribayashi *et al.*, 2022).

Um exemplo significativo de inovação tecnológica é o tijolo de isolamento composto de micélio cultivado naturalmente. Esse tijolo é bioproduzido através do cultivo de um fungo biocompatível e de rápido crescimento, conhecido como *Pleurotus ostreatus*, nas matérias-primas derivadas de bagas de centeio. É crucial destacar que o impacto da densidade e umidade nas propriedades mecânicas dos compósitos de micélio desempenha um papel fundamental. Observa-se que compósitos com densidade aumentada apresentam melhorias na resistência à flexão em níveis baixos e médios de umidade relativa. No entanto, em níveis elevados de umidade, os compósitos exibem menor resistência à flexão, embora apresentem maior deformação. A resistência mecânica desses compósitos de micélio atende, no entanto, aos requisitos estabelecidos para aplicações em transporte e construção (Zhang *et al.*, 2022b).

Contudo, é crucial ressaltar que bons materiais de isolamento se caracterizam por apresentar baixa condutividade térmica, sendo essa propriedade intimamente relacionada à densidade do material. Atualmente, os materiais de isolamento convencionais provêm de diversas fontes, e os compostos sintéticos, como fibras e espumas à base de plástico, são frequentemente escolhidos para isolamento de edifícios. No entanto, esses materiais sintéticos exibem alta energia incorporada, geram uma considerável pegada de carbono e podem liberar substâncias tóxicas. É nesse cenário que surgem novos materiais de isolamento ecologicamente sustentáveis, com base biológica, que muitas vezes demandam menos energia em sua produção quando comparados aos materiais tradicionais. Pesquisas conduzidas com o micélio de cogumelos, por exemplo, têm apresentado resultados considerados satisfatórios para a criação de um material de isolamento sustentável (Dias; Jayasinghe; Waldmann, 2021).

Com relação as propriedades mecânicas dos biocompósitos de micélio, para Gou *et al.*, (2021), diversos grupos de pesquisa exploraram aprimoramentos neste sentido, por meio de modificações na composição dos substratos. Nesse contexto, trabalhando com os biocompósitos de micélio cultivados em serragem de carvalho branco, os resultados obtidos apresentaram uma resistência à compressão quase 6,5 vezes superior àquela cultivada no substrato de palha. Esse método sugere que o aumento na rigidez do enchimento do substrato

está diretamente relacionado à melhoria das propriedades mecânicas dos biocompósitos de micélio cultivados. Apesar de a resistência à compressão não ter experimentado um aumento tão significativo quanto a obtida por meio de processamento mecânico, os micélios formados por esse método caracterizam-se por um processo de produção simples, resultando em custos reduzidos.

Ademais, visando aprimorar a resistência dos biocompósitos de micélio, a aplicação do método de prensagem a quente revelou um substancial aumento na resistência à tração (0,24 MPa) e resistência à flexão (0,87 MPa), representando uma melhoria de 24 vezes. Assim, foi concebido um biocompósito de micélio estruturado em formato de sanduíche, com uma avaliação detalhada de suas propriedades mecânicas. Os resultados demonstraram uma significativa melhoria na resistência à flexão dos biocompósitos de micélio com essa estrutura sanduíche. Após o tratamento com esses métodos, os biocompósitos de micélio (Figura 12) cultivados podem ser empregados como materiais para semi-estruturas, incluindo painéis, pisos e móveis (Gou *et al.*, 2021).

Figura 12 – Biocompósitos de micélio.



Fonte: Punto Sustentable, 2023.

Outro ponto de destaque tecnológico refere-se à perspectiva de biorrefinaria, onde um subproduto agroindustrial, como o farelo de trigo, pode encontrar uma nova aplicação no domínio da fabricação de materiais à base de micélio. Uma estratégia chave envolve a valorização do farelo na ciência dos materiais como matéria-prima para extrair blocos de construção valiosos, como derivados hemicelulósicos, amido, ácido láctico, polifenóis, ácido ferúlico e proteínas. Sem dúvida, a valorização e aproveitamento de subprodutos, como o farelo, têm o potencial de causar um impacto significativo na produção industrial de materiais

compósitos à base de micélio, ao reduzir o tempo de produção e, ao mesmo tempo, aumentar o desempenho mecânico desses materiais (Sisti *et al.*, 2021).

2.8.1 Inovações em pesquisas acadêmicas

Além de produção industrial, os materiais compósitos resultantes do crescimento micelial despertam interesse também no meio acadêmico, graças às suas características econômicas e processo de fabricação sustentável e ecologicamente correto. Para que esses compósitos de micélio possam rivalizar com os materiais sintéticos tradicionais, é fundamental que apresentem propriedades materiais comparáveis e sejam de produção rápida. Nesse contexto, a taxa de produção desempenha um papel crucial, uma vez que a produção por meio do crescimento biológico natural é inerentemente mais lenta em comparação com os processos tradicionais (Jones; Huynh; John, 2018).

Em conformidade com o descrito no meio acadêmico, dentre as várias linhas de pesquisa, há uma que leva em consideração a preservação do ecossistema. Neste sentido, o método de produção de compósitos à base de micélio é considerado ecologicamente responsável devido à valorização de resíduos, contribuindo para a preservação do ecossistema ao evitar a exploração excessiva de recursos naturais (Manan *et al.*, 2021). Materiais derivados de fungos têm aplicações potenciais em diversos setores, como biomédico, papel, embalagens, cosméticos, têxtil e na indústria da construção. Por exemplo, um estudo destacou o desenvolvimento de um adesivo para cicatrização de feridas baseado em micélio carregado com curcumina, apresentando notável resistência mecânica e rigidez. Este adesivo demonstrou liberação controlada de curcumina da matriz de micélio no local da ferida, promovendo a proliferação celular durante o processo de cicatrização (Khamrai; Banerjee; Kundu, 2018).

No entanto, relativo a aplicações biológicas, de acordo com Khamrai, Banerjee e Kundu (2018), o micélio é um aglomerado de hifas utilizado na síntese do material. Esses polímeros naturais são fibrosos e podem ser aplicados em diversas aplicações biológicas. Uma das principais vantagens do método de preparação de filmes de micélio em comparação com os filmes de celulose bacteriana é a etapa de purificação mais fácil. Até o momento, a exploração da biomassa de micélio permanece limitada em comparação com a celulose bacteriana.

Outra aplicação promissora para os micélios está no campo cosmético, onde os cogumelos contêm compostos orgânicos voláteis, como polifenólicos, polissacarídeos, terpenoides, vitaminas e outros, que são benéficos para o cabelo e a pele. Por exemplo, polissacarídeos carboximetilados derivados do cogumelo *Tremella* têm a capacidade de reter

65,7% de umidade mesmo após 96 horas, tornando-os eficazes como hidratantes. Além disso, em comparação com o ácido hialurônico 0,02%, os polissacarídeos Tremella mostraram uma melhor capacidade de retenção de umidade na pele (Wang; Zhang; Zhao, 2015).

De forma mais ampla, os materiais à base de micélio, devido à sua natureza leve e não tóxica, são adequados para uma grande gama de aplicações de embalagens, incluindo eletrônicos, itens frágeis e na indústria alimentícia. Os biocompósitos verdes, feitos de materiais puros de base biológica, podem servir como alternativa às embalagens convencionais derivadas de petróleo em diversos setores. O micélio tem a capacidade de adotar a forma do molde, tornando-o um candidato ideal para materiais de embalagem. Além disso, por meio de condições de crescimento controladas e a escolha de substratos específicos, é possível produzir materiais de micélio personalizados em termos de resistência, densidade e outras características estruturais (Manan *et al.*, 2021).

Adicionalmente, devido à sua natureza porosa, os compósitos de micélio têm sido alvo de estudos e desenvolvimentos como materiais absorventes de som, isolantes térmicos e resistentes ao fogo. Uma pesquisa conduzida por Lee e Choi (2021) explorou o potencial uso das características porosas e similares a filtros do micélio na adsorção de material particulado atmosférico (PM). Nesse contexto, foi avaliado o desempenho de adsorção de PM em compósitos de micélio cultivados em quatro substratos distintos (cânhamo, palha de arroz, lascas de madeira de laca e lascas de madeira de carvalho), comparando-o com um material arquitetônico amplamente utilizado, o painel de pedra (granito Pocheon). Os resultados destacaram um desempenho superior na absorção de PM pelos compósitos de micélio em relação ao granito Pocheon, variando conforme o tipo de substrato. Esses achados indicam o potencial dos painéis compósitos de micélio como materiais adsorventes de PM atmosférico.

Considerando uma abordagem em subprodutos e resíduos agrícolas, como meios para o crescimento de micélio, a reciclagem destes tem atraído também a atenção de pesquisadores interessados na produção de materiais de construção com baixo consumo energético. Além disso, os materiais à base de micélio apresentam diversas vantagens sobre os materiais tradicionais, como baixo custo, biodegradabilidade e menor impacto ambiental, além de uma menor densidade. A utilização de uma ampla variedade de substratos, combinada com técnicas de processamento controladas, possibilita a produção de materiais derivados de micélio com estrutura e função específicas para diversas aplicações. Em materiais menos densos, há uma significativa presença de ar nos espaços livres, reduzindo a condutividade térmica. Esse atributo faz dos materiais menos densos excelentes isolantes térmicos. As bioespumas à base de micélio,

portanto, apresentam grande potencial como alternativas de isolamento térmico na construção e no desenvolvimento de infraestrutura (Pelletier *et al.*, 2013).

Os compósitos à base de micélio também possuem boas características de segurança contra incêndio do que os materiais de construção convencionais, como isolamento de poliestireno e painéis de partículas. Os materiais que usam o micélio são seguros em comparação com os materiais tradicionais oriundos de petróleo altamente inflamáveis, uma vez que os primeiros produzem menos CO₂ e fumo na queima e demoram muito tempo a formar chamas. Essas características únicas tornam os compósitos com micélio uma alternativa viável, de baixo custo, segura e ambientalmente sustentável aos materiais de construção convencionais (Jones *et al.*, 2020).

Dado que a construção civil é um setor sensível, no qual a variabilidade na qualidade do produto pode resultar em falhas súbitas e inesperadas, novos produtos exigiriam avaliações abrangentes da integridade estrutural para seleção e utilização comercial. Vários autores já observaram que as propriedades dos compósitos à base de micélio (MBC) são sensíveis a várias variáveis, incluindo o tipo de substrato, o tipo de fungo, as condições de crescimento e os métodos de processamento. Um entendimento aprofundado do efeito relativo de cada uma dessas variáveis pode levar consideravelmente à otimização do processo de produção, resultando no desenvolvimento de produtos com o espectro apropriado de propriedades adequadas para as indústrias de construção (Alaneme *et al.*, 2023).

A criação de uma solução viável para produtos ambientalmente amigáveis se beneficiará da utilização do micélio fúngico como recurso principal. Esses materiais são todos biocompatíveis e biodegradáveis, apresentando qualidades como alta estabilidade, flexibilidade, sintonização, hidrofobicidade, não inflamabilidade, porosidade, isolamento, crescimento rápido, auto-reparação, auto-organização e auto-cura. A área de biociências está concentrada no uso do micélio na síntese de biomateriais e remediação ambiental, visando produzir uma solução sustentável e segura para os principais desafios globais. Sem dúvida, o mundo científico está reunindo e enfatizando inovações significativas na criação e no uso de materiais verdes (Verma; Jujjavarapu; Mahapatra, 2023).

Desta forma, o produto de uma arquitetura viva (micélio) é caracterizado pelo uso das forças e capacidades proporcionadas por organismos vivos naturais para construir edificações sustentáveis e economicamente acessíveis. O micélio surge como um material promissor para revestimentos, consistindo em filamentos finos que se entrelaçam em diversas direções, conferindo-lhe solidez e propriedades isolantes. Além disso, o micélio é um recurso renovável notavelmente rápido e completamente natural, capaz de crescer em qualquer formato desejado.

Algumas espécies são particularmente duradouras e apresentam resistência ao fogo, o que destaca a importância de características como o sistema hifal para a resistência final do composto, evidenciando a viabilidade do micélio na construção (Vallas; Courard, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia destinada à produção de compósitos de adobe com incorporação de micélio será estruturada em etapas específicas, visando assegurar a eficiência e a qualidade do material obtido. Primeiramente, serão selecionados os insumos principais, como o solo e o fungo *Pleurotus ostreatus*, sendo este último cultivado sob condições controladas para garantir pureza e propriedades adequadas à integração na mistura.

O processo de fabricação compreenderá a combinação dos componentes em proporções previamente definidas, contemplando ajustes necessários ao longo da fase experimental, de modo a promover uma interação otimizada entre o micélio e a matriz terrosa. A metodologia também abrangerá o monitoramento das variáveis ambientais durante o desenvolvimento do micélio, assegurando uniformidade e qualidade no produto final.

Este tópico incluirá, entre outros aspectos, a caracterização da origem dos materiais, propriedades físicas, índices físicos, além da apresentação de resultados parciais dos ensaios realizados para a condução da pesquisa. Serão descritos os equipamentos empregados, acompanhados de suas especificações operacionais, bem como os procedimentos laboratoriais adotados.

3.1 Análise preliminar do solo

Para a análise do solo, torna-se imprescindível avaliar sua aptidão para aplicação em processos construtivos. Através de ensaios *in situ*, é possível realizar uma avaliação preliminar que indicará alternativas viáveis ou, eventualmente, a necessidade de descarte do material. A estabilização do solo poderá ser requerida conforme os resultados obtidos, podendo ser executada por diferentes técnicas. O aspecto fundamental consiste na adoção de métodos que preservem as propriedades naturais do solo, reduzindo impactos ambientais. Patologias como elevada absorção hídrica, capilaridade, baixa resistência mecânica, fissuração e trincamento podem ser mitigadas ou prevenidas mediante procedimentos adequados.

A classificação inicial do solo (Figura 13) foi conduzida por meio da observação de 16 ensaios, entre os quais se destacam: análise da coloração do solo seco, verificação da presença

de minerais, identificação visual e tátil, avaliação do odor, aderência às mãos, brilho superficial, mobilidade da água intersticial, desagregação em meio submerso, teste da queda da bola, determinação da dureza, dureza do solo úmido até a secagem completa, teste da fita, teste do cordão, lavagem do solo, sedimentação e retração linear.

Figura 13 - Processos preliminares de estudo do solo.



(A) separação dos maiores pedriscos para análise de coloração; (B) peneiramento para verificação da presença de minerais; (C) solo fino peneirado para identificação visual e tátil; (D) avaliação do odor (E) queda da bola; (F) teste de sujar as mãos; (G) retração linear; (H) lavagem do solo; (I) sedimentação; (J) brilho superficial; (K) teste da fita; (L) teste do cordão.

Fonte: Autora, 2026.

3.2 Origem e características físicas do solo

O solo usado para produção dos adobes foi coletado no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), nas seguintes coordenadas geográficas: latitude: 21°13'50.71"S e longitude: 44°59'8.83"O, no município de Lavras/MG. Sendo caracterizado por meio dos seguintes ensaios físicos: granulometria pelo método da pipeta conforme Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2017); limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC) DNER-ME 082/94 (DNER, 1994).

3.2.1 Granulometria do solo

A análise granulométrica consiste em determinar o tamanho das partículas que compõem o solo, expressando os resultados em porcentagem em relação ao peso seco total (Das; Sobhan, 2019). Existem diversos métodos para a obtenção desses dados. A norma NBR 7181 (ABNT, 2016), possibilita a determinação da distribuição granulométrica por meio dos processos de peneiramento e sedimentação, onde os resultados são representados graficamente na forma de curva granulométrica.

Por sua vez, o Manual de Métodos de Análise de Solos da EMBRAPA (2017) apresenta procedimentos alternativos, voltados à determinação das proporções de areia, silte e argila, permitindo a representação dos resultados na forma de diagrama trilinear. Dentre esses métodos, destaca-se o método da pipeta, descrito a seguir.

O método da pipeta (Figura 14), conforme protocolo da EMBRAPA, fundamenta-se na determinação da velocidade de sedimentação das partículas do solo, associando técnicas de peneiramento e sedimentação.

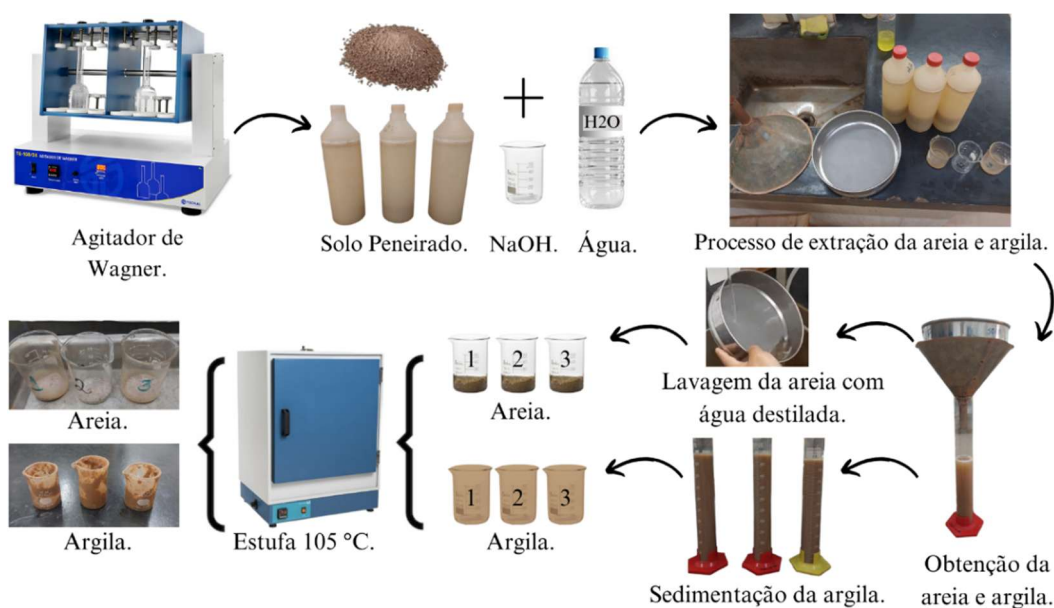
Inicialmente, a amostra é submetida à remoção de agentes cimentantes, como matéria orgânica e carbonatos, seguida por dispersão mecânica e química para promover a completa desagregação dos agregados. Posteriormente, realiza-se a separação da fração areia por peneiramento, utilizando malha padronizada. Essa fração é então seca em estufa e pesada, permitindo o cálculo do percentual correspondente.

A suspensão remanescente, composta por silte e argila, é transferida para um cilindro de sedimentação e completada com água destilada. Após agitação homogênea, aguarda-se o tempo necessário para que as partículas de argila atinjam uma profundidade específica. Nesse ponto, uma pipeta graduada de 25 mL é introduzida na proveta para coleta da suspensão.

A amostra coletada é seca em estufa para determinação da massa de argila, a qual é convertida em relação à massa total do solo, possibilitando o cálculo da porcentagem de argila.

O silte é determinado por diferença, correspondendo ao complemento dos percentuais das outras frações em relação à amostra original, de forma que a soma de todas as frações atinja 100%. Como resultado, as porcentagens de areia, silte e argila são obtidas para classificar a textura do solo.

Figura 14 - Método da Pipeta.



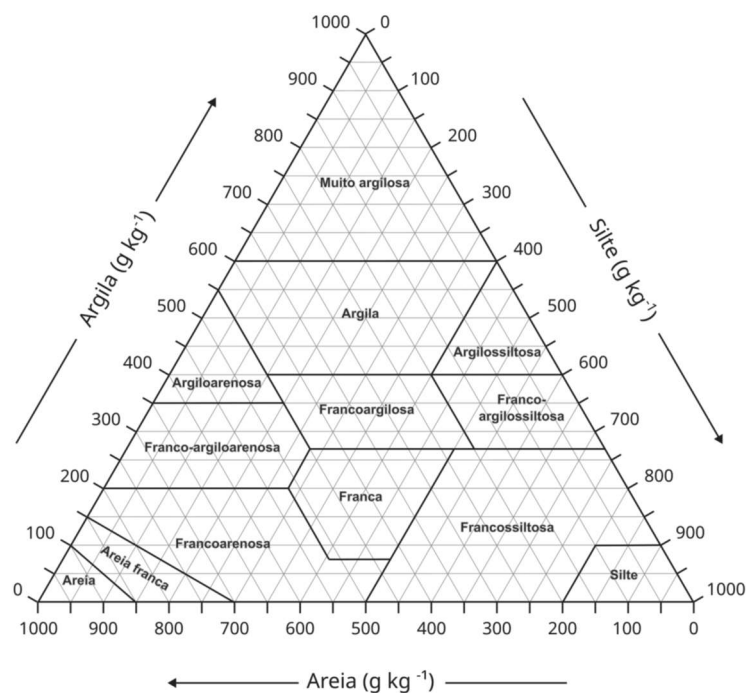
Fonte: Autora, 2026.

Este procedimento visa, portanto, fornecer informações essenciais para a seleção do solo e sua possível estabilização, garantindo a viabilidade de seu uso na produção de materiais de construção, como o compósito de adobe.

3.2.2 Classificação granulométrica

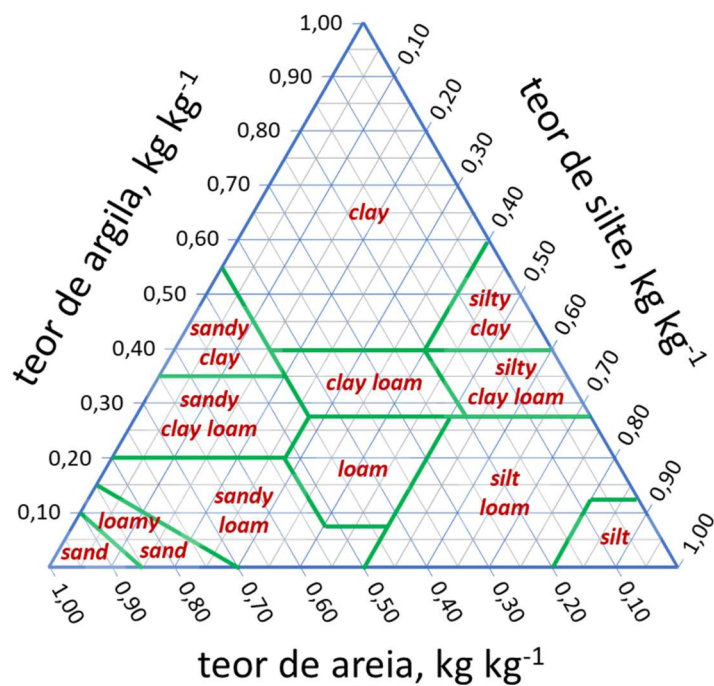
A textura do solo refere-se à proporção relativa das frações granulométricas de areia, silte e argila, cuja soma das porcentagens de suas três frações deve ser igual a 100%. As combinações dessas frações granulométricas são agrupadas em classes de textura conforme mostrado no triângulo textural da EMBRAPA (Figura 15), que por sua vez, foi adaptado do triângulo, conforme classificação da USDA-NRCS (Natural Resources Conservation Services) (Figura 16), com a inclusão da classe muito argilosa.

Figura 15 - Triângulo textural adotado pela EMBRAPA no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.



Fonte: EMBRAPA, 1997.

Figura 16 - Triângulo textural conforme classificação da USDA-NRCS, inspirado em USDA, Natural Resources Conservation Services NRCS.



Fonte: Departamento de Agricultura dos EUA, USDA-NRCS, 1993.

Uma das características físicas mais importantes do solo que caracteriza os teores de areia, silte e argila presentes, é a textura ou composição granulométrica, como descrito acima, onde solos com alta porcentagem de finos, são muito influenciados pela umidade, causando grandes variações nas suas propriedades plásticas (Souza; Rafal; Vieira, 2000). Neste sentido, a simples análise granulométrica não basta para caracterizá-los, sendo fortemente recomendado a caracterização granulométrica juntamente com a de consistência.

Desta forma, a análise da consistência do solo é um dos fatores que influenciam fortemente esses parâmetros, permitindo inferir sobre sua resistência mecânica à compressão (Lorenzo, 2010).

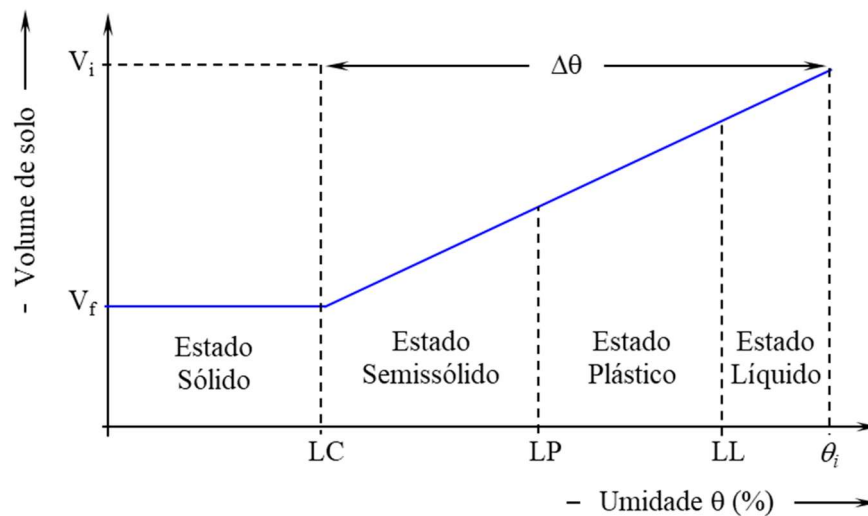
3.2.3 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg ou de consistência pode ser observado na Figura 4, e englobam os limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC). Para estes limites, os teores de umidade natural do solo (θ), fazem a separação entre os estados de consistência sólido, friável, plástico ou viscoso, sendo a passagem de um estado para outro, um fenômeno que ocorre de forma gradual. O estado sólido é caracterizado quando $\theta < LC$. O estado friável ocorre na faixa em que $LC < \theta < LP$, enquanto o estado plástico se estabelece quando $LP < \theta < LL$. Por fim, o estado viscoso é identificado para $\theta > LL$ (Ribeiro; Souza, 2018).

De acordo com a norma NBR 7250 (ABNT, 1982), que estabelece critérios para descrição e identificação de amostras de solo, a plasticidade é definida como a capacidade dos solos finos, dentro de amplos intervalos de umidade, de suportar deformações permanentes significativas sem apresentar ruptura, fissuração ou variação volumétrica relevante. Em outras palavras, trata-se da propriedade do solo de ser moldável sob determinadas condições de umidade, sem fraturar ou perder sua integridade.

Durante estudos sobre o comportamento de solos finos, o químico sueco Albert Atterberg verificou que esses materiais apresentavam variações de consistência em função do teor de umidade, sintetizando suas observações em um esquema representado na Figura 17 a seguir.

Figura 17 - Estados de consistência do solo.



Fonte: Autora e adaptado de Das; Sobhan, 2019.

Os estados de consistência do solo podem ser descritos com base no comportamento relacionado aos limites de plasticidade (limites de Atterberg), os quais constituem parâmetros fundamentais para a classificação e avaliação preliminar de sua adequação a aplicações geotécnicas. No estado viscoso ou líquido, o solo saturado apresenta-se como uma suspensão sem forma definida, com resistência ao cisalhamento praticamente nula. No estado plástico, a massa de solo pode ser moldada sem ocorrência significativa de fissuração ou variação volumétrica. No estado semissólido, o material assume aparência rígida, porém sofre retração quando seco; e, após completa desidratação, atinge o estado sólido, no qual não há mais alteração volumétrica (O’Kelly, 2021).

Os limites de consistência LL (Limite de Liquidez) e LP (Limite de Plasticidade) correspondem a valores de umidade que delimitam esses estados. A partir deles, determina-se o Índice de Plasticidade (IP), obtido pela diferença entre LL e LP.

Outra avaliação relevante é a atividade da argila, atribuída principalmente ao tipo de mineral constitutivo. Essa propriedade pode ser estimada pelo Índice de Atividade (IA), conforme proposto por Skempton (1953), calculado pela razão entre o índice de plasticidade e a fração de argila presente na amostra, conforme apresentado na Equação 1.

$$IA = \frac{IP}{\% \text{ Argila}} \quad (1)$$

De acordo com Skempton (1953), IA menor do que 0,75 são classificados como argila inativa. Sendo assim, o procedimento para a determinação dos limites de Atterberg ou consistência, bem como do índice de plasticidade são descritos a seguir.

3.2.4 Limite de Liquidez (LL)

A execução do ensaio para determinação do Limite de Liquidez (LL) do solo foi conduzida conforme os procedimentos estabelecidos pela norma DNER-ME 082 (DNER, 1994). Para a realização do teste, empregou-se o dispositivo de Casagrande, ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Aparelho de Casagrande.



Fonte: Autora, 2026.

Este procedimento foi efetuado 5 vezes, alterando a umidade para que pudesse variar o processo entre 25 golpes, para cima e para baixo. Após a finalização de todas as etapas do ensaio, a umidade de cada amostra foi calculada por meio da Equação 2, relacionando-a ao número de golpes por meio de um gráfico.

$$h = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

h : teor de umidade em %;

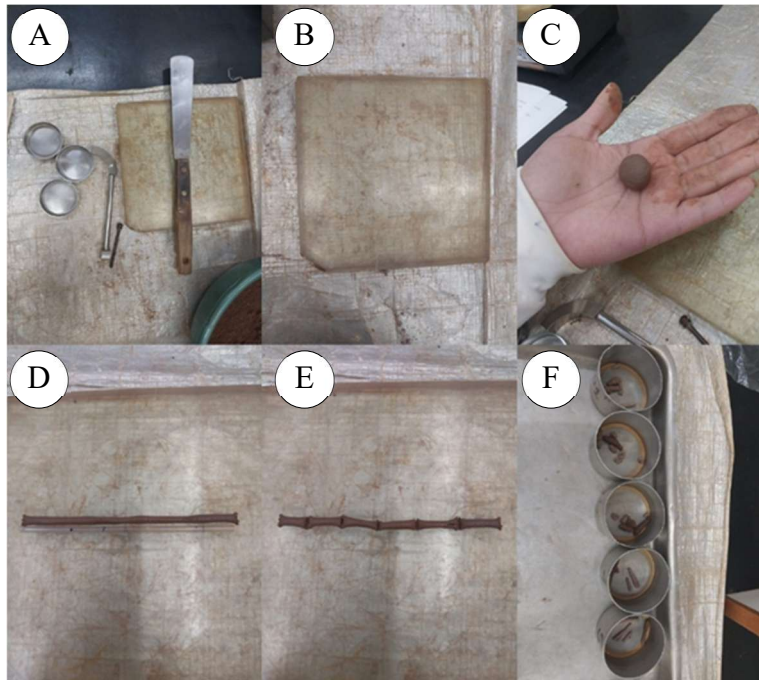
M_u : massa úmida da amostra

M_s : massa seca da amostra

3.2.5 Limite de Plasticidade (LP)

A determinação do Limite de Plasticidade (LP) do solo foi executada conforme os procedimentos especificados na norma DNER-ME 082 (DNER, 1994). O ensaio consistiu na moldagem de cilindros a partir de uma amostra úmida, os quais foram rolados manualmente sobre uma placa de vidro esmerilhado até iniciarem o processo de fragmentação, o que ocorre quando atingem as dimensões padronizadas de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 19. Nessas condições, é obtido o teor de umidade correspondente ao limite de plasticidade, definido como a umidade na qual o solo transita do estado plástico para o estado semissólido.

Figura 19 - Processo de realização do limite de plasticidade.



(A) espátula, placa de vidro, potes metalizados; (B) placa esmerilhada; (C) esfera de solo, (D) solo rolado manualmente sobre a placa; (E) processo de fragmentação; (F) inserção dos fragmentos nos potes metalizados para obtenção da umidade.

Fonte: Autora, 2026.

3.2.5.1 Índice de Plasticidade (IP)

Como forma de medir a plasticidade do solo, foi determinado o índice de plasticidade (IP). Este índice é determinado através da Equação 3 a seguir.

$$IP = LL - LP \quad (3)$$

Onde:

IP – Índice de plasticidade

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

Segundo Jenkins apud Almeida (2005, p.33), é possível caracterizar o solo por meio do índice de plasticidade, conforme Tabela 1:

Tabela 1 - Caracterização do Índice de Plasticidade.

Francamente plástico	$1 < IP < 7$
Medianamente plástico	$7 < IP < 15$
Altamente plástico	$IP > 15$

Fonte: Jenkins apud Almeida, (2005, p.33).

3.2.6 Limite de Contração (LC)

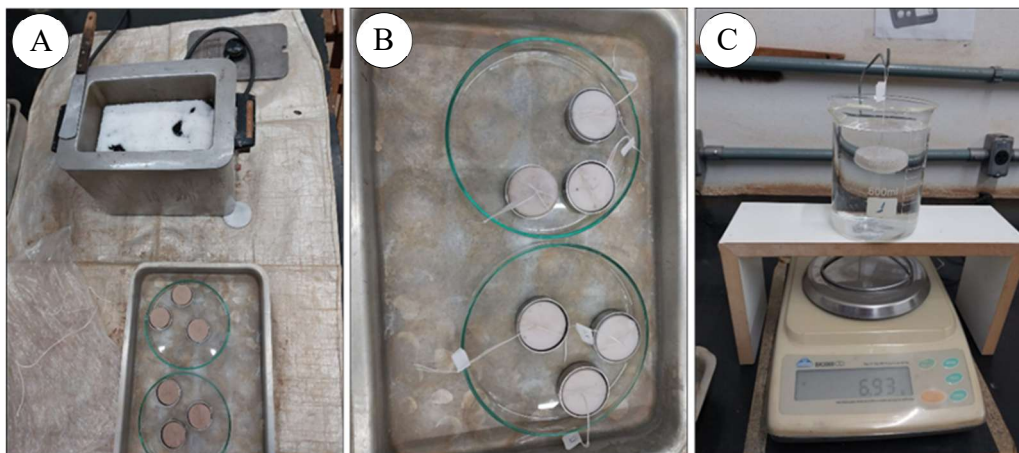
O Limite de Contração (LC) corresponde à umidade que define o limite inferior da zona de friabilidade do solo, sendo, portanto, um dos parâmetros de consistência. Tradicionalmente, sua determinação é realizada por metodologia que emprega mercúrio, o qual apresenta riscos ambientais e à saúde humana. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar um método alternativo utilizando pastilhas parafinadas para a determinação do LC.

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Lavras, adotando seis repetições com o método alternativo baseado na parafina. Essa escolha justifica-se pelo fato de que o procedimento descrito na NBR 7183 (ABNT, 1982) utiliza mercúrio metálico.

No método proposto, o volume do corpo de prova seco (volume final) é obtido após secagem em estufa a 105–110 °C por 24 horas. Em seguida, o corpo é amarrado com cordão e pesado para determinação do peso seco ao ar. Posteriormente, o corpo é imerso repetidamente em banho de parafina a 60 °C até completa cobertura.

Após a secagem, o corpo parafinado é submerso em água destilada para determinação do volume total (corpo + parafina), calculado pela expressão proposta por Gandolfi *et al.*, (1980). A Figura 20 mostra o procedimento do método.

Figura 20 - Processo de determinação do Limite de Contração.



(A) preparação das amostras e aquecimento da parafina; (B) banho de parafina nas amostras de solo; (C) submersão em água para determinar seu volume.

Fonte: Autora, 2026.

Para o cálculo do limite de contração será adotado o procedimento descrito por Stancati, Nogueira e Vilar (1981) conforme Equação 4.

$$U_c = U_m - \frac{(V_o - V_f) \cdot \rho_a}{M_s} \quad (4)$$

Onde:

U_c = limite de contração (%);

U_m = umidade de moldagem (%);

V_o = volume inicial do corpo de prova, igual ao volume do molde (cm^3);

V_f = volume final do corpo de prova (cm^3);

M_s = massa do corpo de prova seco (g);

ρ_a = densidade da água (g cm^{-3})

3.2.7 Difração de Raios-X (DRX)

Neste estudo, a técnica será empregada para a caracterização mineralógica da amostra utilizada no experimento. A difração de raios-X (DRX) consiste em uma técnica analítica não

destrutiva que explora a interação entre a radiação de raios-X e a estrutura cristalina do material, permitindo a identificação e quantificação das fases cristalinas presentes. Esse método baseia-se na incidência da radiação sobre os átomos ou íons constituintes, resultando em padrões de difração característicos (Cullity; Stock, 2001).

Da amostra de solo utilizada para realização da difração de raios-X, foi separada por sedimentação a argila, com a qual procedeu-se o ensaio para a caracterização mineralógica da fração argilosa. Para a análise mineralógica por DRX (Figura 21), empregou-se o método do pó, conduzido no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis (CIMS) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Lavras (UFLA), utilizando um Difratorômetro de Raios X Shimadzu, modelo XRD-6100. O material foi previamente peneirado na malha nº 200 antes do encaminhamento ao laboratório. Sendo exposto a valores de tensão e corrente de excitação, respectivamente, de 40 kV e 30 mA, onde o elemento usado para excitação foi o cobre (Cu). A faixa de variação do ângulo 2θ foi de 10° a 80° e o passo do goniômetro foi de $0,02^\circ$, onde cada ponto corresponde a $0,02^\circ$ em 2θ .

Figura 21 - Difratorômetro de Raio-X (Shimadzu, Modelo XRD-6100), UFLA.



Fonte: Autora, 2026.

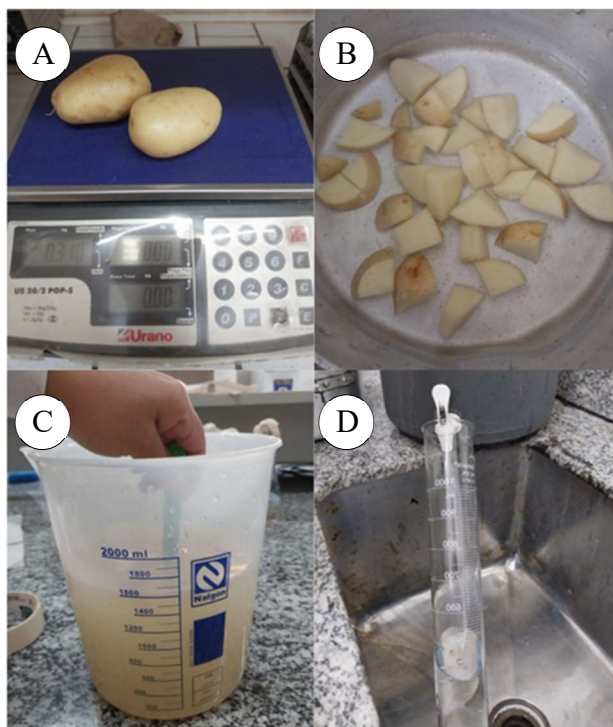
Com base nos dados obtidos da amostra previamente caracterizada e utilizando o software Match! versão 4.2 Build 329 (versão demonstrativa), é possível realizar a identificação das fases cristalinas presentes por meio da análise do padrão de difração. Esse processo consiste na comparação quantitativa entre as intensidades e posições dos picos experimentais e os

valores teóricos, permitindo a correlação com padrões cristalográficos. A finalidade da aplicação do software é viabilizar a confrontação dos dados medidos com as informações disponíveis no banco de dados Crystallography Open Database (COD) (Crystal Impact, 2024).

3.3 Produção do micélio

O processo de produção do micélio, foi produzido conforme procedimentos adotados no Laboratório de Microbiologia da UFLA. Para a preparação do meio de cultivo destinado à produção do micélio, foi utilizado um meio à base de batata (Figura 22). Inicialmente, 300 g de batata crua (A) foram cortadas e submetidas ao cozimento até atingirem uma consistência desintegrada (B). Em seguida, a água proveniente do cozimento foi separada e filtrada por meio de uma peneira com diâmetro de 19 cm, obtendo-se uma solução clara. Essa solução foi transferida para uma proveta e, posteriormente, para um Becker (C), sendo completada com água destilada até atingir o volume final de 1,5 L (D).

Figura 22 - Processo de produção do caldo de batata.



(A) pesagem de 300 g de batata crua; (B) processo de cozimento; (C) transferencia do líquido para beker de plástico; (D) utilização de água destilada para o complemento do meio até atingir 1,5L.

Fonte: Autora, 2026.

Com o caldo de batata preparado (Figura 23), foi utilizado uma proveta para dispor o líquido nos frascos do tipo Erlenmeyer (A), cada um com capacidade de 250 mL, para o processo. Em cada frasco, foram adicionados 150 mL do meio preparado (B). Em seguida, os frascos foram fechados com tampões e cobertos com “chapéus” (C), assegurando vedação adequada, antes de serem submetidos à esterilização em autoclave.

Figura 23 - Meio de caldo de batata pronto.

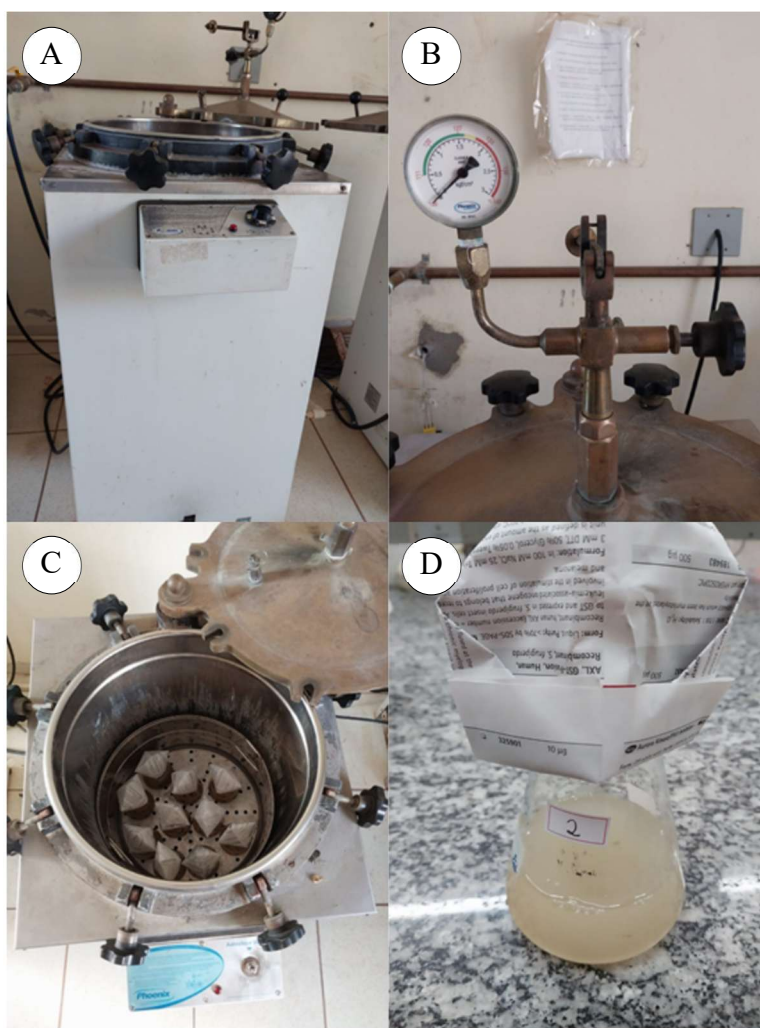


(A) mensuração de 250 ml de caldo para cada Erlenmeyer; (B) Disposição do líquido em Erlenmeyers; (C) tamponagem dos erlenmeyers antes de serem autoclavados.

Fonte: Autora, 2026.

Após a preparação dos frascos Erlenmeyer, estes foram submetidos ao processo de esterilização em autoclave (Figura 24 – A). A operação foi conduzida até que a temperatura interna atingisse 120 °C (B). Uma vez alcançada essa condição, iniciou-se o ciclo de esterilização, mantido por 15 minutos (C). Concluído o tempo estipulado, os frascos foram removidos da autoclave e deixados em repouso por 24 horas, garantindo o resfriamento e a estabilização antes do início da etapa de inoculação do micélio (D).

Figura 24 - Preparo do meio em autoclave.



(A) Autoclavagem dos erlenmeyers; (B) temperatura de autoclavagem de 120 °C; (C) esterilização das amostras em 15 min e abertura da autoclave; (D) erlenmeyers mantidos em repouso para resfriamento.

Fonte: Autora, 2026.

A inoculação do micélio (Figura 25) foi realizada utilizando o fungo *Pleurotus ostreatus* (A). Para cada frasco Erlenmeyer, foram inseridos cinco discos de micélio com 7,9 mm de diâmetro. Esse procedimento foi executado em capela previamente esterilizada com álcool e submetida à luz UV, posicionando-se atrás da chama do bico de Bunsen (B) para garantir condições assépticas. Em seguida, os frascos inoculados com o micélio (C) foram transferidos para uma incubadora do tipo shaker modelo SP 222, operando a 150 rpm e temperatura controlada de 27,8 °C (D).

Figura 25 - Inoculação do micélio.



(A) inoculação do micélio - fungo *Pleurotus ostreatus*, (B) inserção de 5 discos com amostras no interior de cada Erlenmeyer - processo realizado em capela com bico de Bunsen; (C) inoculação dos frascos; (D) inserção em incubadora shaker.

Fonte: Autora, 2026.

À medida que ocorreu o desenvolvimento do micélio, foi possível observar seu crescimento característico (Figura 26), evidenciado pela formação de estruturas esféricas e translúcidas no interior dos frascos de cultivo (A). Essas estruturas indicam elevada atividade metabólica, demonstrando que o microrganismo encontrou condições adequadas de umidade, temperatura e disponibilidade de nutrientes para o desenvolvimento pleno (B). A aparência homogênea e a textura gelatinosa das colônias (C) sugerem um crescimento saudável e uniformemente distribuído no meio líquido. O material biológico obtido, cultivado sob condições controladas, será posteriormente empregado na produção dos blocos de adobe, atuando como agente natural de ligação e reforço estrutural, com o objetivo de aprimorar as propriedades mecânicas e a durabilidade do produto final.

Figura 26 - Micélio.



(A) Desenvolvimento do micélio em Erlenmeyers; (B) estrutura translúcida demonstrando que o microrganismo encontrou condições para o desenvolvimento pleno; (C) aparência homogênea e textura gelatinosa do micélio.

Fonte: Autora, 2026.

3.4 Produção dos corpos de prova de compósitos de adobe

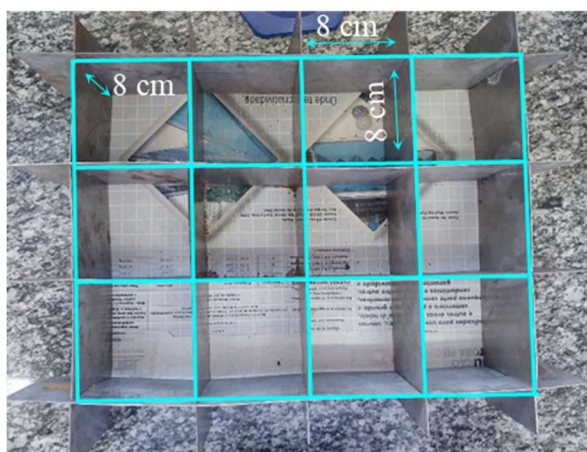
Os blocos de adobe foram produzidos segundo a técnica de Adobe Moldado, reconhecida por sua simplicidade e ampla difusão mundial (Fernandes, 2006). A metodologia aplicada para a elaboração do compósito de adobe com adição de micélio teve como objetivo integrar materiais tradicionais da construção civil a um componente biológico inovador, visando aprimorar as propriedades mecânicas e promover maior sustentabilidade do produto.

O processo contemplou a seleção e preparo adequado do solo, a incorporação do micélio ao composto e a definição das condições ideais para seu crescimento e influência sobre o material. Por meio de etapas controladas de preparação, moldagem e cura, buscou-se otimizar a resistência e a durabilidade dos compósitos, além de reduzir seu impacto ambiental.

A norma NBR 16814 (ABNT, 2020) estabelece dimensões específicas para blocos de adobe com base em um modelo matemático empírico; contudo, variações podem ocorrer em função de critérios regionais e métodos construtivos distintos. Nesse contexto, foi adotada uma forma com dimensões de (8 x 8 x 8) cm para a fabricação de blocos adicionais, destinados a

quatro tratamentos distintos. No total, serão produzidas 15 amostras, distribuídas da seguinte maneira: cinco amostras para ensaio de resistência à compressão, cinco amostras para ensaio de absorção de água por imersão e cinco amostras para ensaio de absorção por capilaridade, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Forma metálica utilizada na confecção dos corpos de prova.



Fonte: Autora, 2026.

3.4.1 Definição dos tratamentos para os corpos de prova dos adobes

Foi estabelecido um processo para a elaboração dos compósitos, no qual os corpos de prova (CPs) foram moldados em formato cúbico, com dimensões de $(8 \times 8 \times 8)$ cm (altura, largura e comprimento), utilizando formas metálicas.

Os tratamentos aplicados aos compósitos de adobe, cada um com cinco repetições, foram definidos da seguinte forma: TC - tratamento controle; TCB - tratamento com caldo de batata e TM2 - tratamento com adição de 2% de micélio e TM5 - tratamento com adição de 5% de micélio. A escolha dos teores de 2% e 5% de micélio foi baseada em estudos sobre materiais terrosos reforçados com fibras naturais e biomateriais lignocelulósicos, os quais indicam que baixos teores de incorporação podem promover melhorias nas propriedades físicas e mecânicas sem comprometer a estabilidade da matriz (Concha-Riedel; Antico; Araya-Letelier, 2020).

Para todos os tratamentos, exceto o controle (TC), foi incorporada cal hidratada do tipo CH-I na proporção de 2%, visando à estabilização do solo. A adição da cal foi adotada com a finalidade de promover o controle microbiológico do material, elevando o pH do meio e reduzindo o desenvolvimento de microrganismos indesejáveis, além de contribuir para a estabilização físico-química do solo. Em baixa dosagem, a cal auxilia na floculação da fração argilosa, reduzindo a plasticidade excessiva, a retração e a fissuração do adobe, sem

comprometer suas características de material à base de terra nem inviabilizar o crescimento micelial (Bailly *et al.*, 2024; Laoudji *et al.*, 2025).

A Tabela 2 apresenta os diferentes tratamentos empregados na produção dos compósitos de adobe com adição de micélio, detalhando os materiais e procedimentos necessários para sua execução. Para cada tratamento, são especificados os componentes essenciais, incluindo a quantidade de solo, volume de água, porcentagem de cal hidratada e, nos casos com micélio, as condições específicas para sua incorporação.

Tabela 2 - Tratamentos empregados na produção dos compósitos.

Tratamento	Solo* (g)	Micélio (%)	Micélio (g)	Água (ml)	Caldo de batata (ml)	Cal Hidratada (g)
TC	717	-	-	260	-	-
TCB	717	-	-	-	260	14,34
TM2	717	2	14,34	260	-	14,34
TM5	717	5	35,85	260	-	14,34

* - Gramas de solo por amostra (total: 5 amostras).

Fonte: Autora, 2026.

3.4.2 Moldagem e secagem dos adobes

As misturas foram realizadas manualmente, obedecendo aos percentuais previamente definidos, com adição de caldo de batata em um tratamento e água natural nos demais. Todo o procedimento foi conduzido até atingir uma consistência adequada para o manuseio e a moldagem, conforme as recomendações da técnica de Adobe Moldado descrita por Fernandes (2006).

O micélio utilizado foi previamente peneirado para remoção do excesso de líquido. O material retido na peneira foi processado em liquidificador com 100 mL de água natural, sendo posteriormente incorporado à fabricação dos adobes.

As misturas foram acondicionadas em formas metálicas com dimensões de $(8 \times 8 \times 8)$ cm, sendo adensadas manualmente para eliminar vazios e garantir o preenchimento completo do molde. A Figura 28 ilustra a sequência do processo de fabricação, que inclui o preparo do micélio, manuseio, mistura do solo com micélio (ou apenas solo, conforme o tratamento), preenchimento das formas e finalização com a desmoldagem dos adobes.

Figura 28 - Processo de produção do adobes.



(A e B) processamento do micélio; (C) homogeneização dos materiais; (D) adição da mistura em formas; (E) corpos de prova desenhados antes da secagem.

Fonte: Autora, 2026.

De acordo com o que estabelece a norma de adobe, NBR 16814 (ABNT, 2020), o tempo de secagem varia de acordo com as condições climáticas de cada região.

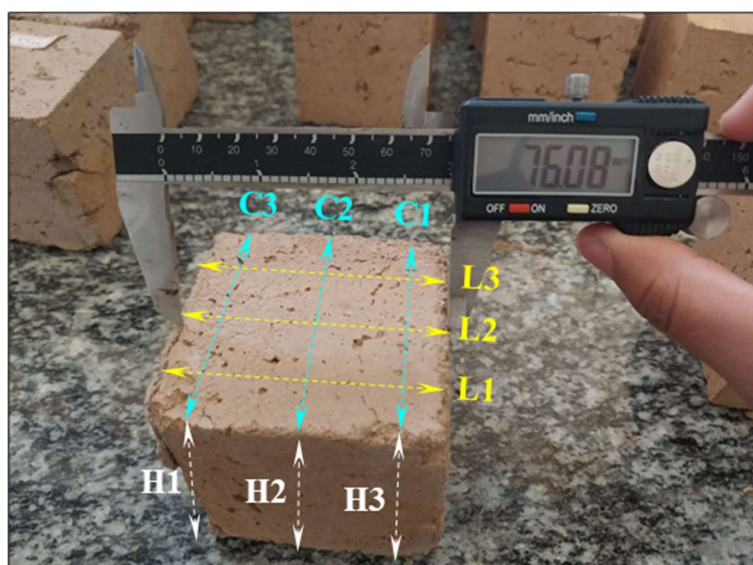
3.5 Ensaio de Retração Linear

O ensaio de retração linear é um parâmetro relevante para avaliar a estabilidade dimensional dos compósitos de adobe. Com a adição de micélio, torna-se possível analisar seu comportamento durante as fases de secagem e cura. Esse ensaio tem como finalidade mensurar a variação nas dimensões de comprimento, largura e altura ao longo do tempo, identificando deformações ou fissuras decorrentes da perda de água. Retrações excessivas podem comprometer a integridade estrutural e reduzir a durabilidade do material. No contexto da incorporação do micélio, o ensaio permitirá verificar se sua presença influencia a taxa de retração e contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e da estabilidade dimensional.

Como não existe padronização pela ABNT para esse ensaio, o cálculo da retração linear foi realizado em três direções (C: comprimento, L: largura e H: altura), conforme metodologia.

As medições das dimensões ($C \times L \times H$) seguiram o procedimento descrito por Linhares Junior *et al.*, (2022), utilizando paquímetro digital. Foram empregados cinco corpos de prova por tratamento, com nove medições por adobe: três no comprimento (C), três na largura (L) e três na altura (H). As dimensões iniciais foram determinadas pelo molde, servindo como referência para análise da variação dimensional em cada direção. As medições finais ocorreram após secagem, período em que os corpos de prova permaneceram sobre superfície plana, permitindo deformações decorrentes da secagem e consequente retração. A Figura 29 ilustra o procedimento de medição nas três direções (C, L e H).

Figura 29 - Medição dos CPs para análise de retração linear.



Fonte: Autora, 2026.

Nesta pesquisa, optou-se por determinar, conforme metodologia proposta por Linhares Junior *et al.*, (2022), a retração relativa (RR) em cada uma das direções do corpo de prova (RRC, RRL e RRH), em substituição à retração linear (RL), que é obtida por medição direta no corpo de prova dentro do molde.

Por não se tratar de um parâmetro normalizado, a retração relativa em cada direção (RRC, RRL e RRH) foi calculada utilizando a Equação 5.

$$RR_x = \left(\frac{D_{ix} - D_{fx}}{D_{ix}} \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

Onde:

RR_{ix} : retração relativa na direção x (C: Comprimento; L: Largura e H: Altura) (%);

D_{ix} : dimensão inicial do adobe recém desmoldado, igual a dimensão do molde, na direção x (mm);

D_{fx} : dimensão final do adobe, após secagem na direção x (mm).

Conforme Linhares Junior *et al.*, (2022), o adobe pode ser considerado um material isotrópico, ou seja, suas propriedades não apresentam variação significativa nas três direções ortogonais. Dessa forma, as retrações relativas obtidas em cada direção (RRC, RRL e RRH) podem ser representadas por sua média, denominada retração relativa linear média, calculada conforme a Equação 6.

$$RR_m = \frac{RR_C + RR_L + RR_H}{3} \quad (6)$$

Onde:

RR_m : retração relativa linear média (%);

RR_C : retração linear média na direção do comprimento do adobe (%);

RR_L : retração linear média na direção da largura do adobe (%);

RR_H : retração linear média na direção da altura do adobe (%);

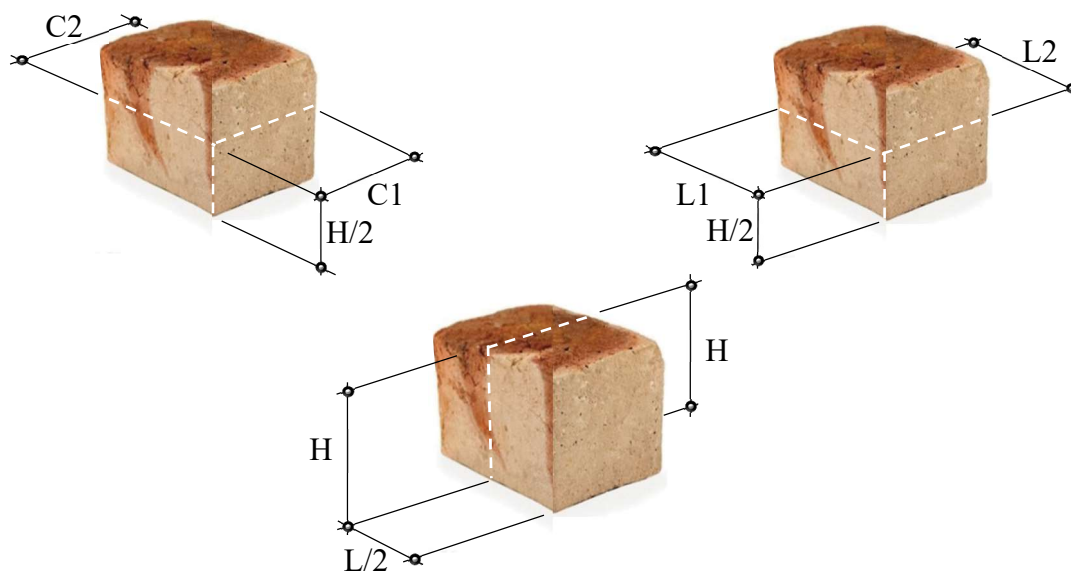
Cabe destacar que os valores médios de retração (RRC, RRL e RRH) foram calculados a partir da média aritmética das cinco amostras que compõem cada tratamento.

3.6 Características Dimensionais

Neste ensaio, foram utilizados todos os adobes moldados e seccionados, totalizando 40 amostras distribuídas em oito tratamentos. A execução seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 16814 (ABNT, 2020), que orienta a medição das dimensões efetivas dos blocos.

A Figura 30, adaptada da referida norma, ilustra o procedimento de medição aplicado aos adobes confeccionados em formas metálicas com dimensões de $(8 \times 8 \times 8)$ cm.

Figura 30 - Medição das dimensões efetivas dos adobe.



Fonte: Autora, 2026; adaptado da ABNT NBR 16814:2020, p.14.

Com base nas dimensões obtidas, conforme as recomendações da norma NBR 16814 (ABNT, 2020), foram calculadas as dimensões médias de cada amostra, utilizando as Equações (7.1, 7.2 e 7.3) apresentadas a seguir.

$$H_i = \frac{H_1 + H_2}{2} \quad (7.1)$$

$$L_i = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (7.2)$$

$$C_i = \frac{C_1 + C_2}{2} \quad (7.3)$$

Onde:

H_i , L_i e C_i são, respectivamente, as medidas de altura, largura e comprimento.

Por fim, após obter as dimensões efetivas de cada CP, as dimensões médias foram determinadas pelas seguintes Equações (8.1, 8.2 e 8.3).

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (8.1)$$

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} \quad (8.2)$$

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (8.3)$$

$$H_m = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (8.1)$$

$$L_m = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} \quad (8.2)$$

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n} \quad (8.3)$$

Onde:

H_m é a altura média, L_m a largura média, C_m o comprimento médio e n é o número de corpos de prova de cada tratamento.

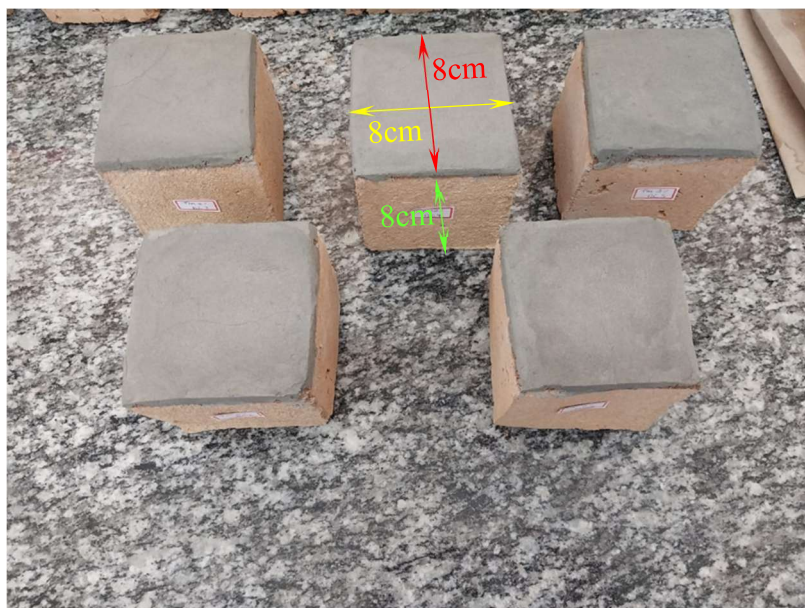
Adicionalmente, foram utilizadas cinco amostras fabricadas diretamente em formas metálicas para os mesmos tratamentos. No total, a análise dimensional foi realizada em 20 corpos de prova, distribuídos em 04 tratamentos, cada um composto por cinco repetições.

3.7 Ensaio de Resistência Mecânica à Compressão

Para o ensaio de resistência à compressão, também foram utilizados 20 (CPs) com cura em ambiente natural. A máquina de ensaio de compressão utilizada para determinar a resistência de adobes atendeu às exigências da NBR 16814 (ABNT, 2020). Com aplicação da carga contínua, e velocidade compatível com o ensaio, que para esta pesquisa foi de 0,35 mm/min proporcionando uma taxa equivalente de 0,88 MPa/min, valor dentro da faixa de 0,5 a 1,0 MPa/min conforme especifica a norma. O equipamento foi previamente calibrado de acordo com a NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016), que estabelece os requisitos de exatidão e verificação das células de carga. O sistema de deslocamento ocorreu conforme a NBR ISO 9513 (ABNT, 2015), assegurando precisão no controle do percurso do atuador. Antes do ensaio, a máquina recebeu uma limpeza nas superfícies de apoio e checagem do alinhamento axial. Assim, o adobe foi centralizado na prensa, com faces planas e niveladas, conforme a norma NBR 16814 (ABNT, 2020), garantindo confiabilidade aos critérios normativos.

Antes da execução do teste, foi necessário realizar o acabamento das faces dos adobes. Para garantir a regularização das superfícies que entram em contato com a Máquina Universal de Ensaio à Compressão Instron, aplicou-se um sistema de capeamento utilizando pasta de cimento com espessura aproximada de 3 mm nas faces superior e inferior, conforme ilustrado na Figura 31.

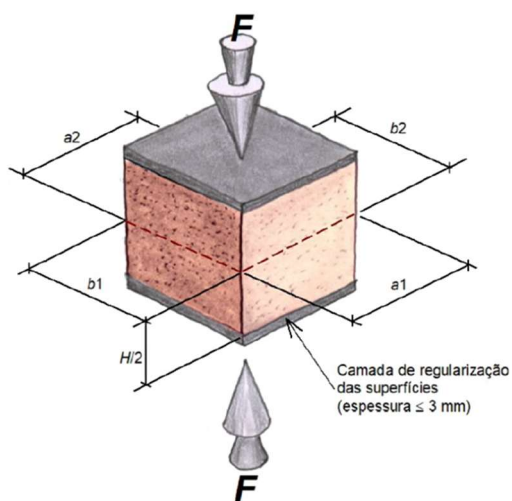
Figura 31 - Capeamento dos corpos de prova.



Fonte: Autora, 2026.

Os corpos de prova foram organizados em quatro tratamentos, cada um composto por cinco repetições, conforme descrito anteriormente para a análise dimensional. Os dados iniciais necessários para este ensaio correspondem às dimensões (a_1 , a_2 , b_1 e b_2), coletadas conforme indicado na Figura 32.

Figura 32 - Medição das dimensões da seção de ruptura do corpo de prova.



Fonte: Anexo B, pág. 18. ABNT NBR 16814, 2020.

Com os dados dimensionais obtidos, procedeu-se com o cálculo da área da seção de ruptura (A_{rup}) para cada amostra através da Equação 9.

$$A_{rup} = \frac{(a1+a2)}{2} \cdot \frac{(b1+b2)}{2} \quad (9)$$

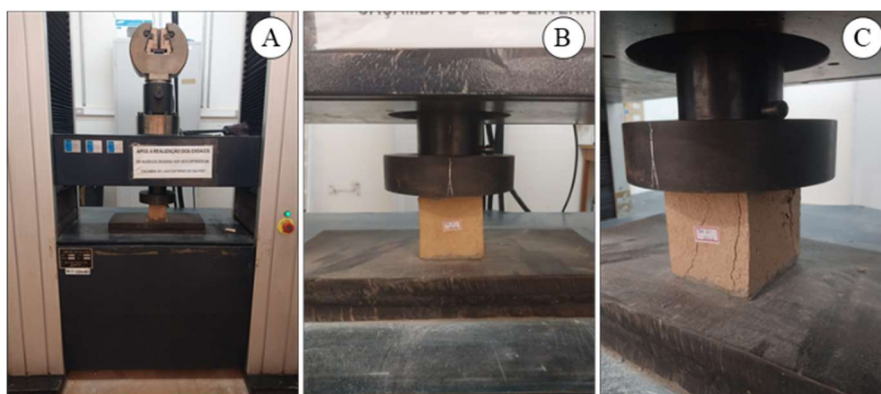
Onde:

$a1$, $a2$, $b1$ e $b2$: são as dimensões da seção de ruptura (a meia altura), expressas em milímetros (mm);

A_{rup} : é a área da seção de ruptura, expressa em milímetros quadrados (mm²).

O rompimento dos corpos de prova foi realizado no Laboratório de Estruturas da UFLA, utilizando a Máquina Universal de Ensaio Instron, ilustrada na Figura 33. Para cada corpo de prova foi determinada individualmente a área da seção transversal, em razão da não uniformidade das dimensões.

Figura 33 - Ensaio de resistência à compressão.



(A) ensaios mecânicos utilizando máquina Universal de Ensaio Instron; (B) corpo de prova inserido no centro da máquina para rompimento; (C) rompimento do corpo de prova.

Fonte: Autora, 2026.

Para a determinação da resistência à compressão do adobe (f_{ca}) cada corpo de prova teve seu valor calculado pela Equação 10.

$$f_{ca} = \frac{F_{rup}}{A_{rup}} \quad (10)$$

Onde:

F_{rup} : força de ruptura, expressa em newtons (N)

A_{rup} : área da seção de ruptura, expressa em milímetros quadrados (mm²);

f_{ca} : resistência à compressão do corpo de prova, expressa em megapascals (MPa).

Após registrados os valores das forças de ruptura, foram determinadas as resistências à compressão. Com os dados disponíveis, foi realizado um estudo estatístico por meio das Equações 11.1 (média aritmética); 11.2 (Variância); 11.3 (Desvio padrão) e 11.4 (Coeficiente de variação) indicadas abaixo. De posse destes parâmetros foi possível promover uma avaliação mais específica e detalhada dos dados alcançados.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (11.1)$$

Onde:

$\bar{x}$: média aritmética das resistências (MPa);

n: número de casos;

x: valor da resistência (MPa).

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (11.2)$$

Onde:

σ^2 : variância (MPa);

x: valor da resistência (MPa);

$\bar{x}$: média aritmética das resistências (MPa);

n: número de casos.

$$D_p = \sqrt{\sigma^2} \quad (11.3)$$

Onde:

D_p : desvio padrão (MPa);

σ^2 : variância (MPa).

$$CV = \frac{D_p}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (11.4)$$

Onde:

CV: coeficiente de variação (%);

D_p : desvio padrão (MPa);

$\bar{x}$: média aritmética das resistências (MPa).

A resistência característica à compressão (f_{cak}), calculada pela Equação 12, é a resistência estatística do lote, sendo calculada a partir da média das resistências individuais menos um fator de dispersão.

$$f_{cak} = f_{cam} - 1,645 \cdot D_p \quad (12)$$

Onde:

F_{cam} : média das resistências individuais, expressa em (MPa)

D_p : desvio padrão;

1,645: fator estatístico (para garantir 95% de confiança).

O f_{ca} , resistência individual, é usado na análise de cada corpo de prova. E o f_{cak} , resistência característica, é usado para a avaliação final do lote, esse valor vale oficialmente para aceitação ou rejeição segundo a norma NBR 16814 (ABNT, 2020). Dessa forma, o valor de f_{cak} , é aquele que deve ser comparado com o limite mínimo normativo ($\geq 1,5$ MPa). Se f_{cak} ficar abaixo do valor exigido, o lote é rejeitado, mesmo que alguns adobes isolados tenham passado.

3.8 Ensaio de absorção de água

A norma NBR 16814 (ABNT, 2020), que trata do adobe, não estabelece procedimentos para ensaios de absorção de água. Dessa forma, este ensaio foi realizado por meio de adaptação à norma NBR 15270-2 (ABNT, 2023), contemplando os métodos de absorção por imersão e por capilaridade.

Quanto ao número de amostras, adotou-se um procedimento semelhante ao utilizado nos ensaios dimensionais e de resistência à compressão para os tratamentos propostos. Foram empregados cinco corpos de prova (CPs) por tratamento, moldados em formas metálicas com dimensões de $(8 \times 8 \times 8)$ cm, totalizando 20 CPs por ensaio ($5 \text{ CPs} \times 4 \text{ tratamentos: TC, TCB, TM2 e TM5}$). Como foram realizados ensaios de absorção por imersão e por capilaridade, o total foi de 40 corpos de prova.

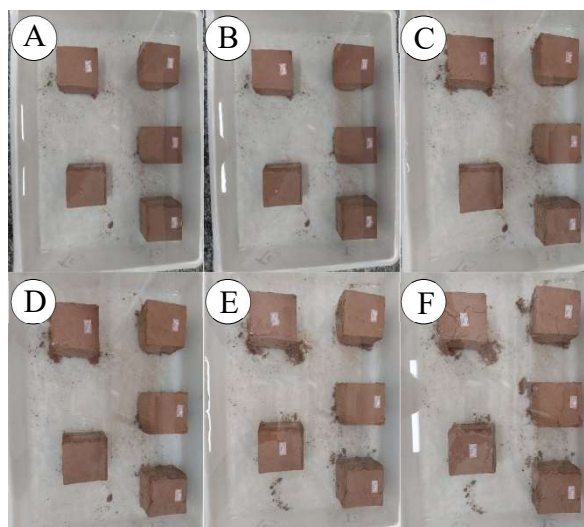
3.8.1 Ensaio de Absorção de Água por Imersão

O ensaio de absorção de água dos corpos de prova foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 15270-2 (ABNT, 2023), com adaptações específicas para o material em estudo (adobe). O objetivo do ensaio é determinar o percentual de absorção de água, parâmetro diretamente associado à porosidade, compactidade e resistência à ação da umidade.

Inicialmente, os corpos de prova foram selecionados de forma representativa (Figura 34), excluindo exemplares que apresentassem fissuras, cantos danificados ou outras imperfeições capazes de comprometer a confiabilidade dos resultados. Antes do início do ensaio, as amostras foram cuidadosamente limpas para remoção de poeira e resíduos superficiais. Em seguida, a massa seca (m_s) de cada corpo de prova foi determinada após 28 dias de cura, utilizando balança analítica de precisão com resolução mínima de 0,01 g.

Posteriormente, as amostras foram totalmente imersas em água potável contida em recipiente de material inerte (plástico rígido), garantindo que a lâmina d'água ultrapassasse em pelo menos 2 cm a superfície superior dos corpos de prova. A imersão foi mantida por um período contínuo de 6 horas à temperatura ambiente (25 ± 2 °C), assegurando a completa penetração da água nos poros do material. Essa etapa substituiu o método de fervura indicado na norma, uma vez que o aquecimento poderia comprometer a estrutura e a integridade física dos adobes.

Figura 34 - Absorção de Água por Imersão



(A) absorção de água por imersão, analisada em 1 hora; (B) em 2 horas; (C) em 3 horas; (D) em 4 horas; (E) em 5 horas; (F) e em 6 horas.

Fonte: Autora, 2026.

Após o término do período de imersão, os corpos de prova foram retirados da água, mantidos em escorrimento por aproximadamente 1 minuto e tiveram o excesso superficial de água removido com pano limpo e umedecido.

Em seguida, as amostras foram imediatamente pesadas para determinação da massa úmida (m_u), conforme ilustrado na Figura 35, evitando atrasos que pudessem ocasionar perda de umidade por evaporação.

Figura 35 - Pesagem dos Corpos de Prova Imersos (CPs).

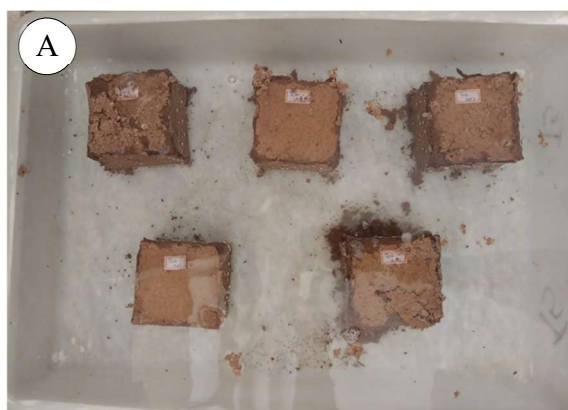


Processo de verificação da absorção de água. (A) Corpo de prova molhado com alteração de coloração em sua lateral, para mais escura; (B) vista superior do CP (B).

Fonte: Autora, 2026.

Após a conclusão dessas etapas, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a 105 °C por um período de 24 horas, sendo posteriormente pesados e novamente imersos em água por mais 24 horas conforme ilustrado na Figura 36. Em seguida, os procedimentos anteriores foram repetidos para garantir a uniformidade do processo.

Figura 36 - Absorção de Água por Imersão (24h)



(A) Absorção de água por imersão, analisada em 24 horas.

Fonte: Autora, 2026.

Com base nessas medições, o índice de absorção de água (AA) foi calculado individualmente para cada corpo de prova, conforme a Equação 13.

$$AA (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

M_u : massa úmida (g);

M_s : massa seca (g).

Durante todo o ensaio, foram observadas e registradas possíveis alterações físicas, como fissuras, desagregações superficiais ou perda de coesão, visando avaliar o comportamento do material frente à ação da água. O ensaio foi conduzido em ambiente controlado de laboratório, com temperatura média de $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar próxima a 60 %, garantindo estabilidade térmica e reprodutibilidade dos resultados.

Para determinar as perdas de massa dos adobes, ou seja, a quantidade de material perdida após a imersão, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a $105 ^\circ\text{C}$ por 24 horas, a fim de eliminar a água residual por evaporação.

Após esse período, os corpos de prova foram novamente pesados, e os dados obtidos foram tabulados e aplicados à Equação 14, permitindo calcular a massa perdida para cada uma das cinco amostras que compõem os tratamentos (TC, TCB, TM2 e TM5). O resultado final foi expresso pela média aritmética dos valores obtidos, seguindo o mesmo critério adotado para a absorção por imersão, agora aplicado às perdas de massa.

$$\text{Perda de Massa (\%)} = \frac{M_{s0} - M_{sf}}{M_{s0}} \quad (14)$$

Onde:

M_{s0} : massa do corpo de prova completamente seco em estufa antes do ensaio;

M_{sf} : massa do mesmo corpo de prova novamente seco em estufa após o ensaio (após remoção do material da superfície, sem se desgastar).

Este ensaio de perdas foi realizado em dois períodos distintos, ou seja, a 6h e 24h de imersão. A massa seca inicial para o ensaio de 24h (M_{s0}) é a mesma massa seca obtida no final do período de 6h (M_{sf}).

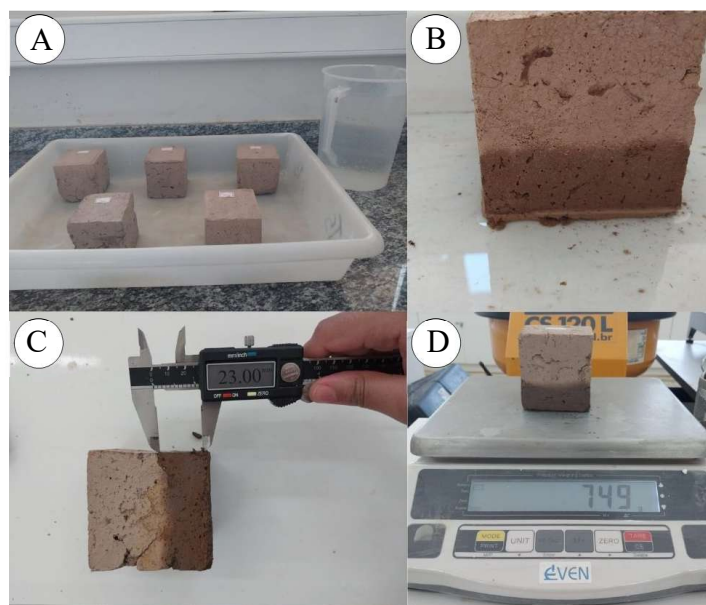
3.8.2 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base no procedimento estabelecido pela norma NBR 15270-2 (ABNT, 2023), com adaptações específicas para corpos de prova de adobe. O objetivo do ensaio é determinar a capacidade do material de absorver água por ação capilar simulando sua interação com a umidade proveniente do solo.

O método consiste em permitir a ascensão da água através da base do corpo de prova, monitorando a altura atingida pela umidade e/ou a variação de massa ao longo do tempo. Para este estudo, foram utilizados cinco corpos de prova representativos, com dimensões aproximadas de $(8 \times 8 \times 8)$ cm. Antes do ensaio, as superfícies foram limpas para eliminar resíduos e assegurar contato uniforme com a lâmina de água.

O procedimento foi conduzido em recipiente raso contendo água potável, formando uma lâmina de aproximadamente 5 mm. Os corpos de prova foram posicionados verticalmente, com imersão parcial da base (cerca de 5 mm), conforme ilustrado na Figura 37. Durante todo o ensaio, manteve-se o nível da água constante e evitou-se qualquer contato lateral entre o líquido e as paredes do adobe, garantindo que a absorção ocorresse exclusivamente por capilaridade ascendente.

Figura 37 - Absorção de Água por Capilaridade.



(A) ensaio de capilaridade com corpos de prova dispostos em uma bandeja; (B) corpos de prova dispostos em lâmina de água para obtenção de sua respectiva ascensão capilar; (C) mensurações dos corpos de prova por paquímetro; (D) mensuração do corpo de prova em balança.

Fonte: Autora, 2026.

As medições foram efetuadas nos intervalos de 10, 30, 60, 120 e 180 min após o início da imersão. Em cada ponto de leitura, foram determinados os parâmetros de altura de ascensão capilar (h_t), obtida por meio de paquímetro, considerando a posição da frente visível da umidade na superfície lateral do corpo de prova e massa úmida (m_t), registrada após a remoção rápida da amostra para pesagem, seguida de reposicionamento imediato no recipiente, visando reduzir perdas por evaporação. A altura de ascensão capilar foi expressa em milímetros (mm) para cada tempo de leitura (t). Quando aplicável, a absorção de água por capilaridade (A_t) foi determinada conforme a Equação 15.

$$A(t)\% = \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \times 100 \quad (15)$$

Onde:

m_t = massa úmida no tempo t (g);

m_0 = massa seca inicial (g).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise granulométrica

Para a determinação dos teores de areia, silte e argila, foram analisadas três amostras, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Determinação granulométrica do solo – Método da pipeta (EMBRAPA)

Amostra	Areia	Silte	Argila
1	63,97%	11,38%	24,65%
2	60,97%	14,92%	24,11%
3	61,93%	12,35%	25,72%
Média	62%	13%	25%

Fonte: Autora, 2026.

A norma NBR 16814 (ABNT, 2020) especifica que, para a produção de adobe, o ideal é um solo com 45% a 65% de areia, até 30% de silte e 25% a 35% de argila. Esses parâmetros garantem a qualidade e segurança da construção, sendo a areia o componente principal, a argila o agente ligante e o silte, responsável pela plasticidade e coesão do material.

Confrontando os dados obtidos com os parâmetros granulométricos recomendados para a produção de adobe, conforme a NBR 16814 (ABNT, 2020) e apresentados na Tabela 4, observa-se que o solo experimental apresenta elevada concentração de areia (62%),

concentração intermediária de argila (25%) e baixa proporção de silte (13%). Esses valores indicam que o solo atende aos intervalos definidos pela norma como adequados para a fabricação de adobe, evidenciando sua conformidade com os requisitos técnicos estabelecidos.

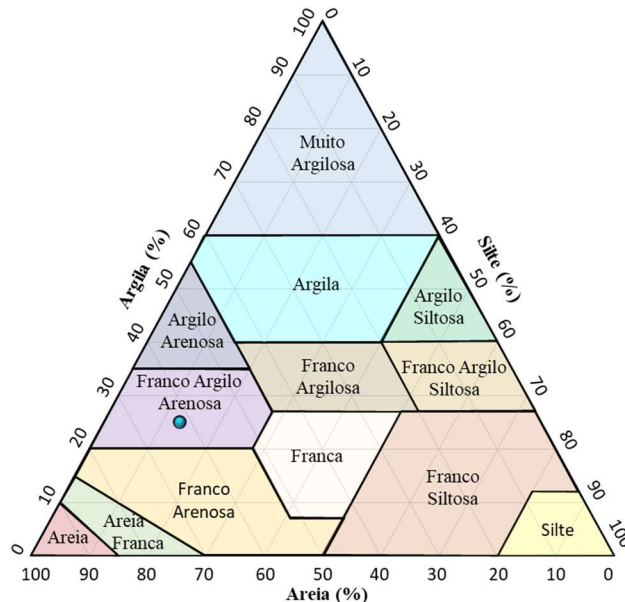
Tabela 4 - Composição física fracionada do solo

Granulometria do solo		Intervalo da NBR 16814:2020
Areia:	62%	45% a 65%
Silte:	13%	até 30%
Argila:	25%	25% a 35%

Fonte: Autora e NBR 16814:2020, p.10.

Para a classificação textural, os dados da composição granulométrica foram aplicados ao triângulo textural da EMBRAPA (Figura 38). A partir dessa análise, verificou-se que o solo apresenta a classe textural Franco-Argilo-Arenosa, conforme os critérios estabelecidos pelo método.

Figura 38 - Triângulo textural adaptado da classificação da USDA-NRCS, com inclusão da classe muito argilosa.



Fonte: Autora, 2026.

Considerando a granulometria desta pesquisa e a classificação determinada pelo triângulo textural da EMBRAPA, é possível inferir uma recomendação para fabricação de adobes. Nesse contexto, Neves e Faria (2011) escreve que o uso de um solo areno-argiloso com pouco silte é o ideal, pois tendo maior teor de areia do que argila, apresenta uma maior

permeabilidade. A análise granulométrica realizada nesta pesquisa confirma que a classificação Franco-Argilo-Arenosa é adequada para a produção de adobe. Essa adequação decorre do equilíbrio entre os teores de argila e areia, característico de solos franco-arenosos, o que assegura boa coesão e resistência ao material, além de favorecer a estabilidade estrutural.

4.2 Limites de consistência

4.2.1 Limite de liquidez (LL)

Para determinação do limite e liquidez, foram coletadas 5 (cinco) amostras e os dados obtidos são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de Limite de Liquidez (LL)

Amostra	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Número de golpes
01	6,63	5,18	40
02	7,64	5,97	32
03	7,43	5,76	27
04	7,27	5,54	20
05	7,49	5,69	12

Fonte: Autora, 2026.

Utilizando a Equação 2, descrita na seção de materiais e métodos, os teores de umidade de cada amostra, relacionadas ao número de golpes, são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultados dos valores de umidade encontrado para as amostras durante o ensaio de Limite de Liquidez (LL)

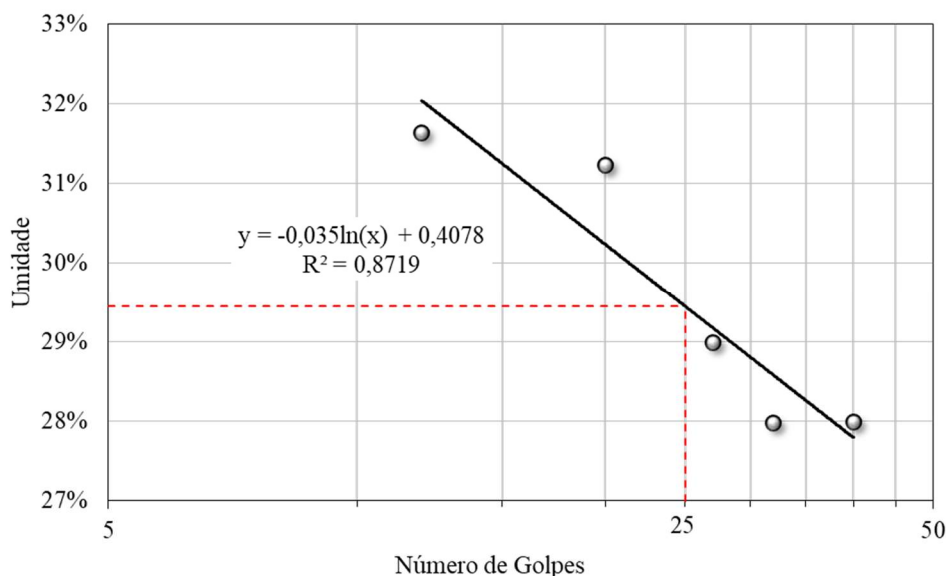
Amostra	Umidade	Número de golpes
01	27,99%	40
02	27,97%	32
03	28,99%	27
04	31,23%	20
05	31,63%	12

Fonte: Autora, 2026.

Com base nos valores de umidade obtidos para cada amostra, foi elaborado um gráfico que representa a relação entre o teor de umidade e o número de golpes aplicados no aparelho

Casagrande, conforme os procedimentos estabelecidos para o ensaio de limite de liquidez (Figura 39).

Figura 39 - Determinação do Limite de Liquidez (LL).



Fonte: Autora, 2026.

A análise da Figura 39 evidencia uma tendência linear entre o teor de umidade e o número de golpes aplicados no aparelho Casagrande. Com base nessa relação, utilizando os dados da Tabela 6 e a Equação 2, ambas apresentadas na seção de Materiais e Métodos, estimou-se, por interpolação linear, o teor de umidade correspondente a 25 golpes, obtendo-se o valor de 29,45%, que caracteriza o limite de liquidez do solo. Segundo (Kaluder *et al.*, 2023), a literatura recomenda que o LL para materiais terrosos deve ser inferior a aproximadamente 45%. Logo o LL atende esta recomendação.

O ajuste do modelo por regressão linear apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 87,19%, indicando que aproximadamente 87,19% da variação da variável dependente (teor de umidade) é explicada pela variável independente (número de golpes). Por se tratar de um valor próximo a 100%, considera-se que o modelo apresentou um bom ajuste.

Contudo, é importante salientar que um R^2 elevado não implica relação de causalidade entre as variáveis. Esse coeficiente apenas indica uma forte associação, demonstrando que a variável independente explica parte da variação observada, mas não necessariamente é sua causa (Eberly College of Science, 2024).

4.2.2 Limite de plasticidade (LP)

O ensaio para determinação do limite de plasticidade foi conduzido utilizando cinco (05) amostras, cujos resultados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados das amostras para o ensaio de Limite de Plasticidade (LP)

Amostra	Massa úmida (g)	Massa seca (g)
01	2,05	1,69
02	1,82	1,50
03	2,37	1,95
04	1,87	1,56
05	1,76	1,46

Fonte: Autora, 2026.

A partir dos dados obtidos no ensaio de limite de plasticidade e aplicando a Equação 1, foi possível estimar o teor de umidade correspondente a cada amostra. Os valores calculados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados de umidade para o ensaio de Limite de Plasticidade (LP)

Amostra	Umidade
01	21,30%
02	21,33%
03	21,54%
04	19,87%
05	20,55%
Média	20,92%
5% da Média	1,05%
Limite mínimo aceitável	19,87%
Limite máximo aceitável	21,97%

Fonte: Autora, 2026.

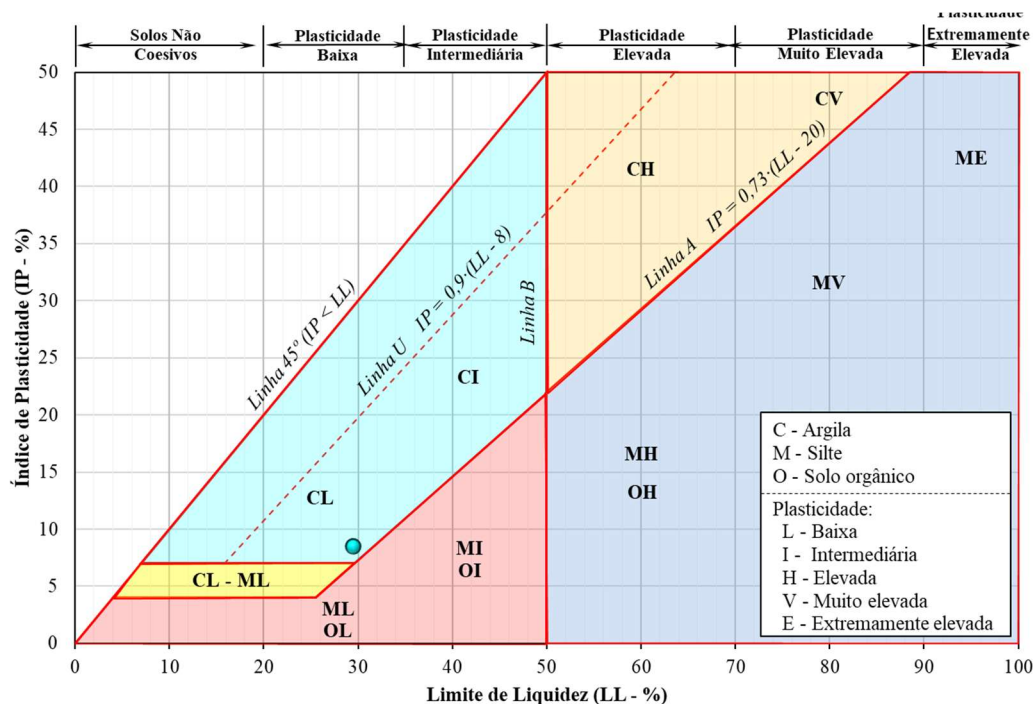
Para a validação do ensaio, conforme os critérios estabelecidos pela NBR 7180 (ABNT, 2016), a diferença entre cada valor individual e a média não deve exceder 5%. Os resultados apresentados na Tabela 8 confirmam que essa exigência foi atendida, garantindo a conformidade do procedimento.

Após a validação, o limite de plasticidade foi obtido pela média das cinco amostras analisadas, resultando em um valor de 20,92%.

4.2.3 Índice de plasticidade (IP)

O índice de plasticidade (IP) foi calculado pela diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP). Esse parâmetro indica a quantidade de água que pode ser incorporada à amostra sem que ela perca sua característica plástica, considerando o limite de plasticidade como referência. Com base nos critérios de caracterização do solo propostos por Jenkins (apud Almeida, 2005, p. 33), verificou-se que a amostra apresenta plasticidade média, uma vez que o índice se encontra na faixa $7 < IP < 15$. A partir dos valores de LL, LP e IP, foi elaborada a Carta de Plasticidade de Casagrande, apresentada na Figura 40, por meio da qual o solo foi classificado como CL, correspondente a uma argila de baixa plasticidade.

Figura 40 - Carta de plasticidade Casagrande.



Fonte: Autora, 2026.

4.2.4 Limite de contração (LC)

Para essa análise, foram utilizadas seis amostras, cujos resultados necessários para a determinação do limite de contração (LC) estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Método da pastilha parafinada. Valores médios do limite de contração (LC).

Parâmetro	Amostra					
	01	02	03	04	05	06
LC	15,55%	18,29%	20,04%	19,65%	16,43%	13,96%
Média (%)	17,32%					

Fonte: Autora, 2026.

Pode-se verificar pela Tabela 9 que o limite de contração médio foi de 17,32%. Estudos sobre solos para produção de blocos de adobe indicam que o Limite de Contração (LC) é um parâmetro crucial para avaliar a aptidão do solo, pois reflete a capacidade de deformação sem fissuração durante a secagem (Brito *et al.*, 2023; Souza Junior *et al.*, 2025). Solos com LC elevado, tipicamente associado a solos com maior plasticidade e limites de Atterberg adequados, apresentam menor propensão à fissuração, garantindo melhor desempenho mecânico dos blocos.

O Limite de Contração (LC) de 17,32% obtido para o solo em análise indica um comportamento potencialmente favorável quanto à redução da retração volumétrica e da formação de fissuras. A fissuração em solos utilizados na construção com terra está diretamente associada aos processos de retração decorrentes da perda de umidade. Assim, quando o teor de umidade de moldagem se aproxima da faixa do limite de contração, as variações volumétricas são minimizadas, reduzindo a formação de fissuras e favorecendo o desempenho mecânico do material (Zhang *et al.*, 2022a). No entanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, uma vez que a literatura técnica não estabelece valores de referência universais ou faixas ideais bem definidas para o LC em materiais destinados à construção com terra.

Desta forma o resultado obtido para LC confere ao solo características favoráveis ao desempenho em sistemas construtivos baseados em terra crua. Mediante a literatura, o comportamento volumétrico estável, aliado à baixa tendência à fissuração, confirma que o material possui potencial tecnológico significativo, alinhado às recomendações atuais para o uso de solos de baixa atividade em construções sustentáveis.

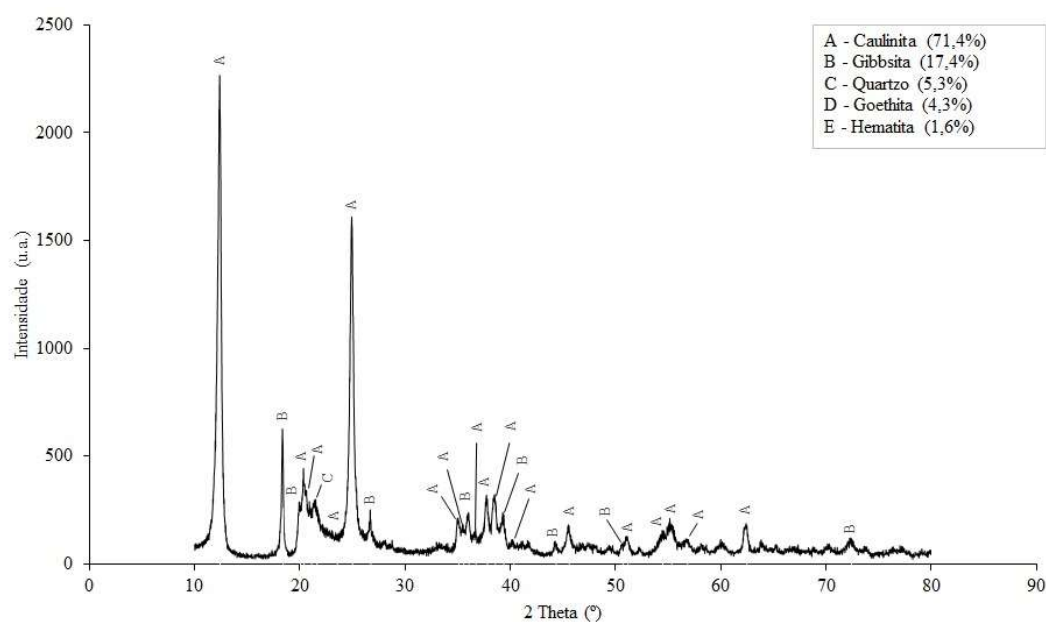
4.3 Difração de Raios-X (DRX)

A partir da argila extraída da amostra de solo, procedeu-se com o ensaio de DRX, onde foram obtidos dados com auxílio do software *Match! – Phase Identification from Powder Diffraction*, sendo possível identificar as fases presentes na argila do solo ensaiado através do

padrão de difração da amostra, comparando as intensidades e posições dos picos mensurados experimentalmente, com valores teóricos.

A mineralogia da argila utilizada foi obtida por meio de DRX e pode ser visualizada no Figura 41.

Figura 41- Mineralogia da argila processada em DRX



Fonte: Autora, 2026.

O objetivo desta análise foi identificar os principais constituintes minerais, considerando como fases predominantes, aquelas com teor superior a 5 ou 10% em massa. O difratograma obtido evidencia a presença majoritária de caulinita (71,4%), seguida por gibbsita (17,4%) e quartzo (5,3%). Fases minoritárias, com teor inferior a 5%, também foram detectadas, como goethita (4,3%) e hematita (1,6%), porém não foram destacadas no difratograma devido à baixa representatividade. Da mesma forma, sobreposições entre picos não foram enfatizadas, priorizando-se os minerais mais relevantes.

Resultados semelhantes foram reportados por Silva, Da Silva e De Oliveira (2025) em estudos de caracterização de argilas cauliníticas, nos quais se observou predominância de caulinita com picos intensos e bem definidos no difratograma de raios X, indicando seu potencial para aplicações industriais, especialmente na construção civil.

A elevada proporção de caulinita é, em grande parte, positiva para a produção de adobe, pois, esse mineral confere baixa plasticidade e menor retração volumétrica, contribuindo para maior estabilidade dimensional, aspecto destacado em estudos sobre o papel dos minerais argilosos no desempenho físico de adobes (Concha-Riedel; Gallegos; Soto, 2021).

A análise mineralógica revelou uma presença expressiva de gibbsita, um hidróxido de alumínio que, segundo Alfonso *et al.*, (2022), está associado a solos de baixa atividade coloidal. Essa característica implica menor capacidade de troca iônica e reduzida variação volumétrica, resultando em comportamento estável frente a ciclos de umedecimento e secagem. A baixa plasticidade conferida pela gibbsita limita a retenção de água, reduzindo a formação de fissuras e deformações no adobe, o que contribui para maior estabilidade dimensional e durabilidade do material.

O quartzo, identificado em proporção de 5,3%, embora relativamente baixa, exerce papel significativo na matriz do solo. Como mineral inerte e de elevada dureza, o quartzo atua como esqueleto granular, diminuindo a plasticidade e aumentando a resistência mecânica do adobe. Essa função estrutural é corroborada por Silva, Da Silva e De Oliveria (2025), que destacam a presença de quartzo (SiO_2) em argilas cauliníticas como fator determinante para maior rigidez e menor deformabilidade, favorecendo a integridade física do material ao longo do tempo.

A ocorrência de óxidos de ferro, como goethita e hematita, ainda que em concentrações reduzidas, é particularmente relevante. Esses minerais promovem cimentação natural entre as partículas, aumentando a coesão interna e a resistência à compressão. Cornell e Schwertmann (2003) ressaltam que tais óxidos contribuem para a durabilidade do adobe, pois reduzem a desagregação em ambientes úmidos e melhoram a estabilidade estrutural.

Por outro lado, a ausência de minerais expansivos, como esmectitas, é um fator positivo para a performance do adobe. Środoń (2002) explica que argilas do grupo das esmectitas apresentam alta capacidade de expansão e retração, induzindo fissuração e perda de integridade mecânica em ciclos de variação de umidade. A inexistência dessas fases na amostra analisada indica menor suscetibilidade a patologias relacionadas à movimentação volumétrica, garantindo maior durabilidade e estabilidade dimensional do material.

Portanto, o conjunto mineralógico encontrado nesta pesquisa é bastante favorável à produção de adobe.

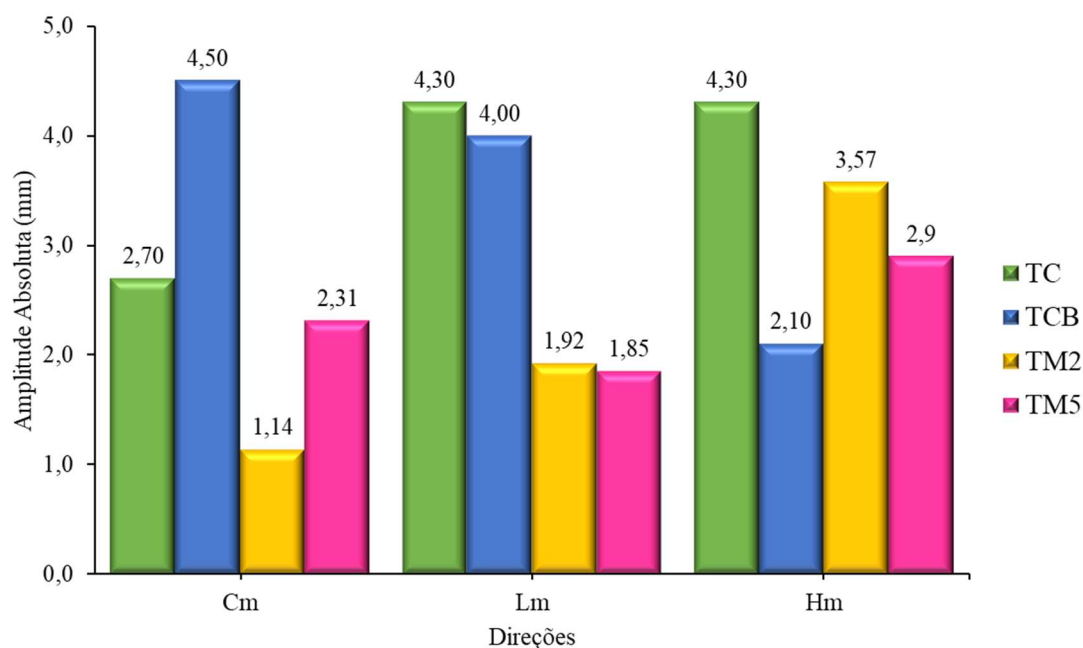
4.4 Análise dimensional

O controle dimensional de elementos construtivos em terra crua é requisito fundamental para garantir estabilidade geométrica, desempenho mecânico e compatibilidade modular. A NBR 16814 (ABNT, 2020) estabelece critérios para avaliação de adobes, incluindo verificação de dimensões, tolerâncias e regularidade geométrica.

Diante disso, foi apresentado a análise estatística e tecnológica dos resultados dimensionais obtidos em quatro tratamentos de adobe.

A amplitude absoluta, inicialmente representada graficamente, Figura 42, tem o propósito de mostrar o efeito visual das variações entre tratamentos e, revela diferenças relevantes do ponto de vista tecnológico.

Figura 42 - Amplitude absoluta de CPs de adobe nas direções de Cm, Lm e Hm.



Fonte: Autora, 2026.

As maiores amplitudes observadas, organizadas na Tabela 10, foram para o TC com 4,30 mm, na direção (Hm), TCB com 4,50 mm, na direção (Cm), TM2 com 3,57 mm, na direção (Hm) e TM5 com 2,90 mm, na direção (Hm). Verifica-se que a direção (Hm) é predominante.

Tabela 10 – Amplitude absoluta em (mm) de corpos de prova de adobe.

Tratamento	Cm	Lm	Hm
TC	2,70	4,30	4,30
TCB	4,50	4,00	2,10
TM2	1,14	1,92	3,57
TM5	2,31	1,85	2,90

Fonte: Autora, 2026.

A menor amplitude, em duas das três direções (Cm e Lm) foi verificada para o tratamento TM2 com 1,14 mm em (Cm) e para TM5 com 1,85 mm em (Lm), indicando maior controle dimensional nessas direções.

Embora a amplitude não seja uma medida estatisticamente robusta (por considerar apenas extremos), ela possui relevância prática em controle tecnológico, pois representa o maior desvio dimensional possível dentro de um lote.

Segundo a NBR 16814 (ABNT, 2020), a regularidade dimensional contribui para: desempenho estrutural adequado; redução de patologias; compatibilidade modular e melhor desempenho em alvenaria estrutural.

4.4.1 Precisão experimental e pressupostos estatísticos

A análise preliminar dos pressupostos estatísticos indicou que os resíduos apresentaram distribuição normal, conforme teste de Shapiro-Wilk, não havendo necessidade de transformação dos dados, o que reforça a estabilidade estatística do experimento. Assim, aceita-se a hipótese de normalidade dos resíduos, não sendo necessária transformação dos dados, conforme recomendações para modelos lineares em DIC (Ferreira, 2016).

4.4.2 Análise de variância (ANAVA)

A ANAVA, Tabela 11, indicou efeito significativo de Tratamento ($p < 0,05$) e da interação Tratamento $\times$ Dimensão ($p < 0,05$) e efeitos principais isolados não significativos para Dimensão ($p = 0,1356$).

O coeficiente de variação ($CV = 1,57\%$) foi considerado muito baixo para ensaios dimensionais com materiais de terra crua. Em termos práticos, esse resultado demonstra elevado controle experimental, tanto na moldagem quanto na medição dos corpos de prova. Em estudos com materiais de construção, CV inferiores a 5% indicam boa homogeneidade do processo produtivo (Basu *et al.*, 2024).

Tabela 11 - ANAVA do ensaio dimensional de corpos de prova de adobe.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	3	19,970245	6,656748	4,681	0,0060
Dimensão	2	5,927110	2,963555	2,084	0,1356
Tratamento x Dimensão	6	32,390330	5,398388	3,796	0,0036
Erro	48	68,267000	1,422229		
Total corrigido	59	126,554685			
CV (%)	1,57				
Média geral:	76,1095000	Número de observções:		60	

Fonte: Autora, 2026.

A significância da interação indica que o efeito dos tratamentos depende da direção avaliada (Cm, Lm ou Hm), evidenciando comportamento anisotrópico do material, sendo necessário realizar o desdobramento, evitando conclusões baseadas apenas nos efeitos principais.

Estudos apontam que materiais terrosos apresentam retração diferencial em função da orientação das partículas, teor de umidade e mecanismos de secagem, o que justifica a dependência direcional observada (Touati *et al.*, 2023). Assim, a significância da interação confirma que não é possível discutir tratamentos sem considerar a direção geométrica avaliada.

4.4.3 Teste de comparação de médias (Tukey 5%)

Considerando que a análise de variância indicou interação significativa entre Tratamento e Dimensão ($p < 0,05$), procedeu-se ao desdobramento dos fatores, conforme recomendado para experimentos fatoriais em delineamento inteiramente casualizado. A interpretação dos efeitos principais isolados não é apropriada na presença de interação significativa, sendo necessária a análise dos efeitos simples.

A significância da interação demonstra que o efeito dos tratamentos depende da direção dimensional analisada, o que é evidenciado na Tabela 12, para o desdobramento da interação, considerando Tratamento dentro de dimensão.

Na dimensão Cm, o TM2 apresentou a maior média (77,97 mm), diferindo de TC e TM5, enquanto TCB apresentou valor intermediário, sem diferença estatística em relação aos demais tratamentos. Esse resultado indica que a inserção de 2% de micélio promoveu incremento dimensional nessa orientação, possivelmente devido à atuação da rede micelial como agente de ligação estrutural (Islam *et al.*, 2018).

Tabela 12 - Análise do desdobramento de Tratamento dentro de cada nível de Dimensão.

Tratamento	Dimensão (mm)		
	Cm	Lm	Hm
TC	75,00 b	76,00 a	77,90 a
TCB	76,16 a b	76,40 a	76,50 a b
TM2	77,97 a	75,76 a	76,22 a b
TM5	75,64 b	74,60 a	75,17 b

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Na dimensão Lm, não houve diferença significativa entre os tratamentos, evidenciando comportamento dimensional semelhante independentemente da presença de caldo de batata ou micélio.

Para a dimensão Hm, o tratamento controle (TC) apresentou maior média (77,90 mm), diferindo de TM5, enquanto TCB e TM2 apresentaram valores intermediários, sem diferirem estatisticamente dos demais tratamentos. Esse comportamento pode indicar que, nessa direção, a incorporação do micélio não promoveu aumento dimensional adicional em relação ao controle, possivelmente devido à anisotropia estrutural do material e à forma de crescimento das hifas, que tendem a se distribuir preferencialmente conforme a disponibilidade de substrato e condições ambientais (Schoder *et al.*, 2024).

De forma geral, os resultados evidenciam que o efeito dos tratamentos depende da dimensão avaliada, confirmando a existência de interação entre os fatores.

Para o desdobramento de Dimensões dentro de cada nível de Tratamento, Tabela 13, no tratamento TC, Hm foi superior a Cm e Lm. Para TCB e TM5, não houve diferenças estatísticas entre as dimensões, indicando maior uniformidade dimensional. Em TM2, Cm foi superior a Lm, enquanto Hm apresentou valor intermediário, sem diferir estatisticamente das demais dimensões, reforçando que a presença do micélio influencia de forma distinta as direções avaliadas.

Tabela 13 - Análise do desdobramento de Dimensão dentro de cada nível de Tratamento.

Dimensão (mm)	Tratamento			
	TC	TCB	TM2	TM5
Cm	75,00 b	76,16 a	77,97 a	75,64 a
Lm	76,00 b	76,40 a	75,76 b	74,60 a
Hm	77,90 a	76,50 a	76,22 a b	75,17 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Para TCB, não houve diferenças significativas entre as dimensões, indicando maior uniformidade dimensional quando associado com caldo de batata. Esse comportamento pode estar relacionado à melhor distribuição da umidade e maior homogeneização da matriz.

No tratamento TM2, a dimensão Cm apresentou maior média, diferindo estatisticamente de Lm, enquanto Hm apresentou valor intermediário, não diferindo estatisticamente das demais dimensões. Esse resultado reforça que a presença do micélio influencia de forma distinta as direções avaliadas, provavelmente em função da organização tridimensional da rede micelial, que pode atuar como reforço estrutural direcionado (Islam *et al.*, 2018).

Para TM5, não foram observadas diferenças significativas entre as dimensões, sugerindo comportamento dimensional mais homogêneo nesse tratamento.

Dessa forma, em uma análise integrada, as diferenças observadas confirmam que a inserção de micélio pode alterar o comportamento dimensional do material, porém esse efeito é dependente da orientação analisada.

Resultados semelhantes têm sido relatados em pesquisas envolvendo compósitos miceliais, nas quais se observa influência significativa da formulação e da direção de crescimento fúngico nas propriedades físicas e dimensionais do material (Schoder *et al.*, 2024).

Portanto, conclui-se que o tratamento TM2 apresentou desempenho superior na dimensão Cm. A menor variação longitudinal observada no TM2 sugere redução da retração diferencial. Estudos recentes indicam que maior uniformidade estrutural pode estar associada à melhoria do desempenho mecânico e redução de fissuração em blocos estabilizados (Alvarez *et al.*, 2025; Faria *et al.*, 2025; Meimaroglou; Mouzakis, 2024).

4.5 Retração Relativa Linear Média (RRm)

Serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de Retração Relativa Linear média (RRm) realizados em corpos de prova de adobe, conforme metodologia descrita em Materiais e Métodos. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e inferencial, por meio da análise de variância (ANAVA) e do teste de comparação de médias de Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%.

Os resultados são discutidos à luz da literatura científica e em conformidade com os princípios estabelecidos pela NBR 16814 (ABNT, 2020), que trata dos requisitos e métodos de ensaio para adobes.

4.5.1 Precisão experimental e pressupostos estatísticos

A estatística descritiva dos dados de retração relativa linear média (RRm), expressos em porcentagem, obtidos para os tratamentos TC, TCB, TM2 e TM5, são apresentados na Tabela 14. A análise mostra coeficiente de variação (CV) entre 4,41% e 29,00% e, amplitudes de 0,82% a 3,27%.

Tabela 14 - Estatística descritiva para retração relativa linear média (RRm) de CPs de abobe.

Tratamento	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Amplitude (%)
TC	4,70	0,6707	14,27	3,93	5,37	1,44
TCB	4,80	1,3920	29,00	3,00	6,27	3,27
TM2	4,21	1,0954	26,02	2,95	5,56	2,61
TM5	7,76	0,3422	4,41	7,23	8,05	0,82

Fonte: Autora, 2026.

Verifica-se que os CV para TCB e TM2 indicam alta variabilidade dos dados experimentais, característica esperada em ensaios com materiais naturais, especialmente aqueles à base de solo, cuja heterogeneidade granulométrica e mineralógica influencia diretamente as propriedades físicas, como a retração linear. Estudos mostram que valores situados entre 20% e 30% são frequentemente observados em experimentos envolvendo materiais terrosos, utilizados na produção de adobe (Touati *et al.*, 2023).

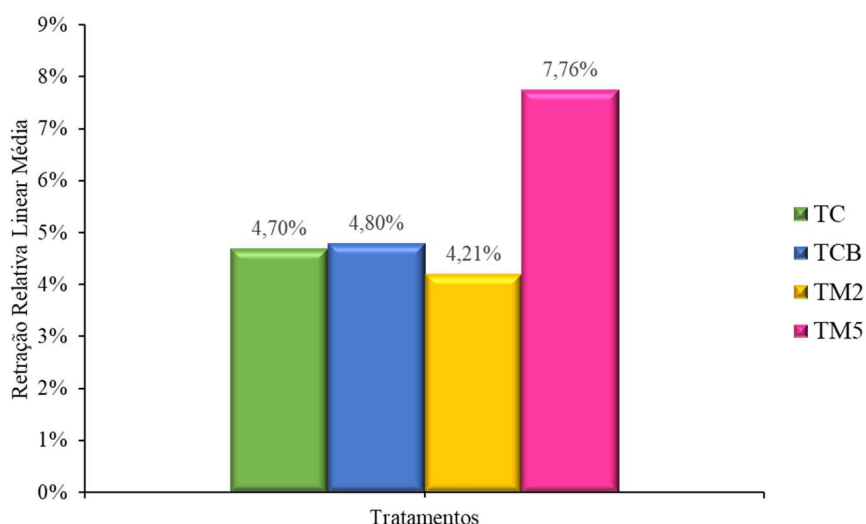
Embora os dados apresentem elevada variabilidade, observa-se uma tendência de comportamento em função do teor de micélio. Nota-se que a retração dos corpos de prova tende a aumentar com a elevação do teor de micélio de 2% para 5%, conforme evidenciado na Figura 43.

Esse comportamento pode estar associado à natureza porosa e higroscópica dos compósitos miceliais, cuja microestrutura influencia diretamente as variações dimensionais decorrentes de ciclos de umidade e secagem. Estudos apontam que materiais à base de micélio apresentam elevada porosidade e baixa densidade, propriedades que afetam seu desempenho mecânico e dimensional conforme a composição do compósito (Madusanka *et al.*, 2024).

Embora a literatura aponte que esses compósitos são higroscópicos, ou seja, trocam umidade com o ambiente, a retração observada depende de como essa água é liberada pela estrutura do material (Teeraphantuvat *et al.*, 2024). Assim, a diferença entre os tratamentos sugere que o teor de micélio influencia a microestrutura do compósito e, consequentemente, sua retração linear.

Considerando que as propriedades físicas desses materiais ainda requerem investigação aprofundada para aplicação construtiva (Vašatko *et al.*, 2022), os resultados obtidos sugerem que o incremento de micélio pode alterar a estabilidade dimensional, aumentando a suscetibilidade à retração durante a secagem.

Figura 43 - Retração relativa linear média (RRm) em corpos de prova de abobe.



Fonte: Autora, 2026.

A análise da amplitude dos dados reforça esse comportamento, quando se evidencia coerência entre valores de amplitude com CV por tratamento. O TM5 apresentou a menor amplitude (0,82%) e menor CV (4,41%), enquanto o TCB apresentou a maior amplitude (3,27%) e maior CV (29,00%), confirmando que a dispersão interna influenciou diretamente o coeficiente de variação.

Segundo a literatura, valores elevados de CV em ensaios de retração de materiais de terra crua são comuns e aceitáveis, desde que os pressupostos estatísticos sejam atendidos. Em particular, os tratamentos TCB e TM2 apresentaram valores acima de 25%, o que sugere heterogeneidade na amostragem ou nos efeitos dos tratamentos (Pimentel-Gomes, 2021). Em conformidade com os resultados, verificou-se que, em ensaio de retração em materiais terrosos, coeficientes de variação mais elevados são comuns devido à variabilidade natural da composição granulométrica e mineralógica (Labat *et al.*, 2022).

4.5.2 Análise de variância (ANAVA)

A ANAVA foi realizada no Sisvar 5.8 (Ferreira, 2016) com os dados originais (sem transformação), uma vez que o teste de normalidade Shapiro-Wilk indicou conformidade com a distribuição normal.

A análise de variância, Tabela 15, revelou efeito significativo dos tratamentos sobre a Retração Relativa Linear média (RRm) com ($p < 0,001$) logo, rejeita-se a hipótese nula de igualdade entre médias, indicando que pelo menos um tratamento difere estatisticamente dos demais.

Tabela 15 - ANAVA sem transformação para a análise dimensional dos CPs de adobe.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	3	39,243860	13,081287	14,127	0,0001
Erro	16	14,815560	0,925972		
Total corrigido	19	54,05942			
CV (%)	17,93				
Média geral:	5,3670000		Número de observções:	20	

Fonte: Autora, 2026.

O coeficiente de variação ($CV = 17,93\%$) pode ser considerado moderado, sugerindo adequada precisão experimental para ensaios com materiais biocompósitos e sistemas solo-biomaterial, nos quais variações inerentes ao processo biológico e às interações físico-químicas são esperadas. Valores de CV entre 10% e 20% são usualmente considerados aceitáveis em experimentos com materiais naturais como solos e adobes (Silva; Ribeiro, 2021).

4.5.3 Teste de comparação de médias (Tukey 5%)

O teste de Tukey a 5% de probabilidade, Tabela 16, indicou a formação de dois grupos estatísticos distintos, grupo “a”: TM2 (4,21%), TC (4,70%) e TCB (4,80%) e grupo “b”: TM5 (7,76%).

Tabela 16 - Médias de RRm para diferentes Tratamentos pelo teste de Tukey.

Tratamento	RRm
TC	4,70 a
TCB	4,80 a
TM2	4,21 a
TM5	7,76 b

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Os tratamentos TC, TCB e TM2 não diferiram estatisticamente entre si, mas diferiram do TM5, que apresentou média significativamente superior de retração.

Isso indica que a inserção de 5% de micélio (TM5) promoveu aumento significativo da retração linear média em comparação aos demais tratamentos.

O tratamento controle (TC), sem micélio, apresentou RRm média de 4,70%. O tratamento TCB apresentou comportamento estatisticamente semelhante ao controle e ao TM2, indicando que a adição de caldo de batata não promoveu alteração significativa na retração do material.

Já o tratamento TM2 (2% micélio) apresentou a menor média de retração (4,21%), embora sem diferenças estatísticas em relação ao TC e TCB. Esse resultado indica que, em baixa concentração, o micélio pode contribuir para uma reorganização microestrutural favorável, possivelmente atuando como agente de ligação fibrosa e promovendo redistribuição de tensões durante a secagem. Estudos indicam que redes miceliais podem atuar como reforço biológico, reduzindo fissuração em biocompósitos quando utilizadas em concentrações adequadas (Voutetaki; Mpalaskas, 2024).

Entretanto, o tratamento TM5 (5% micélio) apresentou retração significativamente maior (7,76%). Esse comportamento pode estar relacionado a maior retenção de água devido à biomassa fúngica; maior porosidade após secagem; intensificação da perda de umidade associada à degradação parcial da matriz orgânica.

Altas concentrações de micélio podem aumentar a fração orgânica e a porosidade do sistema, favorecendo retração durante a secagem (Elsacker *et al.*, 2020). Esse efeito explica a distinção estatística observada pelo teste de Tukey.

4.6 Resistência à compressão

4.6.1 Fundamentação técnica da análise estatística

Os dados de resistência à compressão individual (f_{ca}) dos adobes foi avaliado inicialmente quanto ao atendimento dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variância dos resíduos. E a ANAVA conduzida para um delineamento inteiramente casualizado (DIC) com quatro tratamentos e cinco repetições, sendo: TC - tratamento controle; TCB - tratamento com caldo de batata; TM2 - tratamento com 2% de micélio e TM5 - tratamento com 5% de micélio.

A análise descritiva dos dados de resistência à compressão, Tabela 17, indicou variação nos desvios padrão entre tratamentos, com razão aproximada de 3:1 ($0,1924/0,0618 = 3,11$) entre o maior e o menor valor, sugerindo possível heterogeneidade de variâncias.

Tabela 17 - Estatística descritiva para resistência à compressão de CPs de abobe.

Tratamento	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Mínimo (MPa)	Máximo (MPa)	Amplitude (MPa)
TC	0,97	0,1565	16,13	0,70	1,07	0,37
TCB	0,29	0,0618	21,31	0,20	0,36	0,16
TM2	0,43	0,0966	22,47	0,31	0,55	0,24
TM5	1,23	0,1924	15,64	0,97	1,41	0,44

Fonte: Autora, 2026.

Observou-se ainda tendência de aumento da amplitude absoluta nos tratamentos com maiores médias de resistência (TM5 e TC), indicando dependência entre média e variância.

4.6.2 Análise de variância (ANAVA)

Com o objetivo de atender aos pressupostos da análise de variância, conforme evidenciado através da estatística descritiva, foi aplicado o teste Shapiro-Wilk no software Sisvar 5.8 (Ferreira, 2016), que evidenciou que a distribuição não atende os requisitos de normalidade, indicando a necessidade de transformação dos dados. Dessa forma foi aplicada, conforme análise da estatística descritiva, a transformação Raiz ($Y+1$) aos dados de resistência à compressão. Conforme Kutner *et al.*, (2005) e Montgomery (2020), transformações do tipo raiz quadrada são recomendadas para variáveis contínuas não negativas com variância proporcional à média.

Com a transformação Raiz ($Y+1$), os pressupostos foram melhor atendidos e a ANAVA, Tabela 18, indicou efeito significativo dos tratamentos sobre a resistência à compressão ($p < 0,001$). Logo rejeita-se a hipótese de nulidade H_0 de igualdade entre médias.

Tabela 18 - ANAVA com transformação Raiz ($Y+1$) para o fca de CPs de adobe.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	3	0,425291	0,141764	57,594	0,0000
Erro	16	0,039383	0,002461		
Total corrigido	19	0,464675			
CV (%)	3,80				
Média geral:	1,3060499	Número de observções:		20	

Fonte: Autora, 2026.

Desta forma, com a transformação de dados, foi verificado uma redução substancial do coeficiente de variação (CV) de 18,71% para 3,80%, evidenciando elevada precisão experimental. Isso indica que a variabilidade residual foi adequadamente controlada no modelo estatístico, não significando alteração dos valores físicos reais, mas sim melhor ajuste matemático para inferência.

4.6.3 Teste de comparação de médias (Tukey 5%)

Os valores apresentados no teste de média, Tabela 19, correspondem aos dados originais de resistência à compressão (f_{ca}), enquanto a comparação estatística entre tratamentos foi realizada com inferência aos dados transformados pela função Raiz ($Y+1$), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 19 - Médias de f_{ca} de CPs de adobes. Dados transformados por Raiz ($Y+1$).

Tratamento	f_{ca} media
TC	0,97 a
TCB	0,29 b
TM2	0,43 b
TM5	1,23 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, aplicado aos dados transformados por Raiz ($Y+1$). As médias apresentadas correspondem aos valores originais da variável f_{ca} .

Fonte: Autora, 2026.

O teste de Tukey indicou que a inserção de 5% de micélio (TM5), elevou significativamente a resistência em relação a TCB e TM2, e o tratamento TC não diferiu estatisticamente de TM5. No entanto a adição isolada de caldo de batata (TCB) reduziu significativamente a resistência à compressão, sem diferir estatisticamente de TM2. Em contraste ao TM5, a inserção de 2% de micélio (TM2) não foi suficiente para promover ganho mecânico significativo, justificando a baixa resistência observada (0,43 MPa). Esse comportamento é coerente com estudos que demonstram que há um limiar mínimo de colonização micelial necessário para que ocorram ganhos mecânicos significativos (Elsacker *et al.*, 2020; Soh *et al.*, 2020).

Embora nenhum tratamento tenha atingido o limite normativo de 1,5 MPa, observa-se tendência clara de melhoria com maior teor micelial, caso do TM5, cujo valor obtido (1,23 MPa) representa avanço relevante considerando que o compósito de micélio se trata de uma fase experimental. Neste contexto, estudos demonstram que compósitos à base de micélio apresentam incremento de resistência mecânica à medida que aumenta a densificação da rede fúngica (Attias *et al.*, 2020).

Assim, o desempenho do TM5 pode ser interpretado como tecnicamente promissor, especialmente quando considerado o caráter sustentável do compósito. Além do mais, embora 5% de micélio apresentou incremento de aproximadamente 26,8% em relação ao TC, eles não diferem estatisticamente entre si. E ainda, o TM5 apresentou um desempenho quase três vezes superior ao TM2, demonstrando que o aumento do teor micelial promoveu ganho mecânico consistente.

A resistência obtida pelo TM5 (1,23 MPa) corresponde a 82% do valor normativo, indicando que o material se aproxima do requisito técnico e apresenta potencial de adequação mediante otimização do processo produtivo.

Conforme Tabela 20, a resistência característica (f_{cak}), que considera a dispersão dos resultados, evidencia que o TM5 apresentou o maior valor característico (0,91 MPa), que corresponde a aproximadamente 74% da sua resistência média. Embora o valor de 0,91 MPa ainda esteja abaixo do mínimo normativo de 1,5 MPa, ele representa um incremento de 237% em relação ao TM2 e de 28% em relação ao TC. Ou seja, mesmo sob critério conservador, o teor de 5% de micélio promoveu ganho estrutural significativo. Estudos apontam que compósitos miceliais tendem a apresentar maior dispersão de resultados quando comparados a materiais cimentícios convencionais (Elsacker *et al.*, 2020). Portanto, analisar o f_{cak} é fundamental para avaliar confiabilidade estrutural.

Tabela 20 - Valores médios de (f_{ca}) e (f_{cak}) para CPs de adobe.

Tratamento	f_{ca} (MPa)	f_{cak} (MPa)
TC	0,97	0,71
TCB	0,29	0,19
TM2	0,43	0,27
TM5	1,23	0,91

Fonte: Autora, 2026.

A redução da resistência à compressão observada nos tratamentos TCB e TM2, formulados com a utilização de caldo de batata e micélio, em relação ao TC, embora represente uma abordagem inovadora e ambientalmente favorável, não resultou em incrementos mecânicos expressivos nas condições avaliadas, evidenciando que o uso de aditivos biológicos ainda demanda otimização quanto à formulação e dosagem.

A baixa resistência à compressão observada no tratamento com caldo de batata (TCB) cujo valor de f_{ca} foi de 0,29 MPa, pode ser diretamente associada à elevada porosidade nos corpos de prova. A porosidade é reconhecida como um dos principais parâmetros estruturais que influenciam negativamente o desempenho mecânico de materiais de construção, uma vez que os vazios internos reduzem a área efetiva resistente e funcionam como concentradores de tensão.

De acordo com Sun *et al.*, (2022), o micélio atua como um agente de ligação biológica capaz de promover uma rede micelial mais contínua e interconectada, promovendo maior integração entre as partículas do solo. Esse efeito estrutural contribuiu para o aumento significativo da resistência à compressão observado no tratamento TM5 em relação ao TM2.

Segundo Zhang *et al.*, (2025), a resistência mecânica de compósitos está intimamente relacionada à densidade e à continuidade da matriz sólida, sendo que o aumento do volume de vazios resulta em queda significativa da capacidade de suporte à compressão. De forma semelhante, Elsacker *et al.*, (2020) demonstraram que compósitos com maior teor de vazios apresentam redução proporcional da resistência devido à menor conectividade estrutural interna.

No ensaio de resistência à compressão, observou-se que os corpos de prova submetidos ao tratamento com caldo de batata (TCB) apresentaram redução nos valores médios de resistência quando comparados ao TC e aos tratamentos com micélio. Esse comportamento pode ser explicado pelas propriedades físico-químicas do amido presente no caldo de batata. O incremento de vazios internos decorrente da evaporação da água retida pelo amido pode

justificar a redução da resistência mecânica observada nos corpos de prova tratados com TCB (Tang *et al.*, 2022).

Diferentemente dos tratamentos com micélio, que desenvolvem rede tridimensional de hifas capaz de promover interligação fibrosa entre partículas adjacentes (Attias *et al.*, 2020), o TCB não apresentou mecanismo estrutural compensatório capaz de reduzir ou reorganizar os vazios internos.

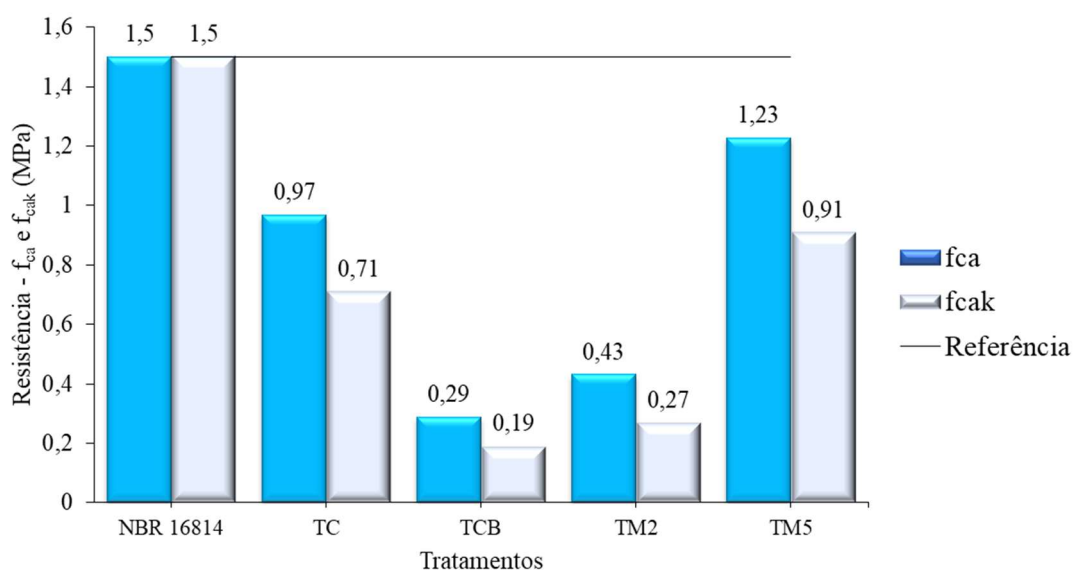
Dessa forma, a provável porosidade elevada no TCB explica coerentemente o valor reduzido de resistência média (0,29 MPa) e resistência característica (0,19 MPa), uma vez que, a área resistente efetiva foi reduzida e a propagação de microfissuras foi facilitada. Assim, a microestrutura mais porosa constitui fator determinante para o baixo desempenho mecânico desse tratamento.

Além da especificação utilizada na formulação dos tratamentos, a composição granulométrica do solo utilizado para a produção dos corpos de prova também é relevante na determinação da f_{ca} . Corroborando com isso, relatos na literatura, indicam que compósitos à base de micélio apresentam ganhos em termos ambientais e funcionais, porém frequentemente apresentam desempenho mecânico inferior quando não associados a uma matriz mineral com teor adequado de argila (ABNT NBR 16814, 2020; Dormohamadi; Rahimnia, 2020).

Com a realização do ensaio granulométrico, obteve-se 62% de areia, 13% de silte e 25% de argila, mostrando que esses valores estão dentro dos intervalos recomendados pela NBR 16814 (ABNT, 2020) (areia: 45% a 65%, silte: até 30%, argila: 25% a 35%) para blocos de terra crua. No entanto verifica-se que o ligante mineral, caracterizado pela argila, por estar vinculado ao mínimo recomendado pela norma pode ter influenciado a resistência à compressão. Embora a granulometria do solo enquadra-se à NBR, isso não garante, por si só, resistência mecânica satisfatória (Turco *et al.*, 2024).

A Figura 44 mostra uma representação integrada de f_{ca} e f_{cak} , de onde pode ser evidenciado toda discussão sobre os resultados obtidos.

Figura 44 – Resistência – f_{ca} e f_{cak} em corpos de prova de abobe.



Fonte: Autora, 2026.

4.7 Absorção de água

4.7.1 Absorção de água por capilaridade

Os coeficientes de variação (CV) iniciais vão de 8,34% (TC a 30 min) a 41,03% (TM5 a 10 min), indicando elevada dispersão relativa, especialmente nos primeiros tempos e no tratamento TCB e TM5 (Tabela 21). Essa heterogeneidade sugere que a variabilidade entre repetições é significativa, justificando a necessidade de transformação dos dados para atender aos pressupostos de normalidade e homogeneidade da ANOVA (Nascimento *et al.*, 2024).

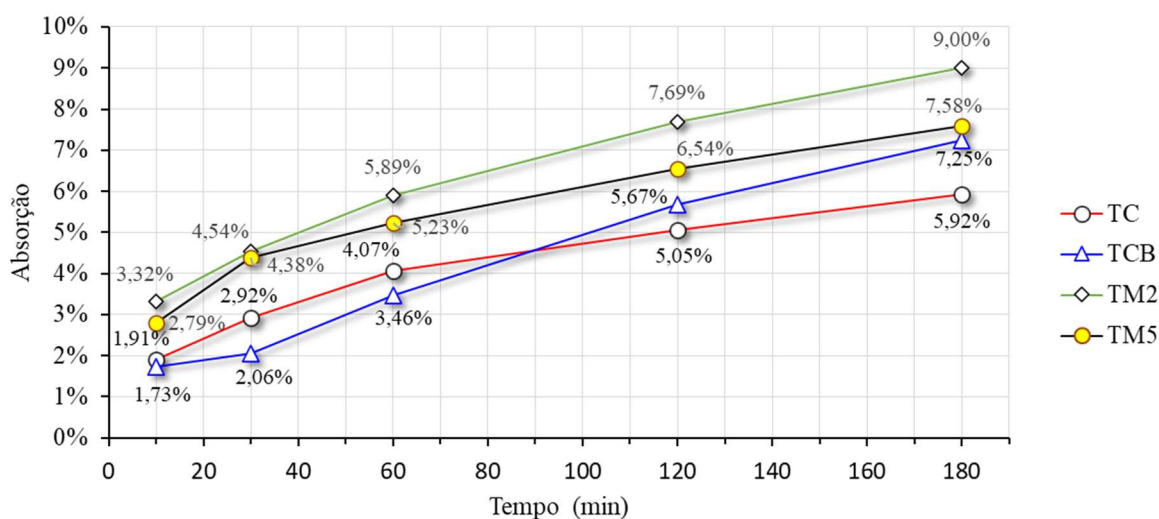
Tabela 21 - Estatística descritiva para absorção por capilaridade em CP de abobe.

Tratamento	Tempo (min)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Amplitude (%)
TC	10	1,91	0,1983	10,38	1,67	2,15	0,48
TC	30	2,92	0,2435	8,34	2,64	3,15	0,51
TC	60	4,07	0,3565	8,76	3,62	4,44	0,82
TC	120	5,05	0,4378	8,67	4,56	5,44	0,88
TC	180	5,92	0,5612	9,48	5,23	6,45	1,22
TCB	10	1,73	0,2512	14,52	1,50	2,02	0,52
TCB	30	2,06	0,1951	9,47	1,81	2,33	0,52
TCB	60	3,46	0,3429	9,91	3,16	4,04	0,88
TCB	120	5,67	0,5160	9,10	5,25	6,52	1,27
TCB	180	7,25	0,7373	10,17	6,45	8,39	1,94
TM2	10	3,32	0,5023	15,13	2,90	4,19	1,29
TM2	30	4,54	0,5443	11,99	3,96	5,38	1,42
TM2	60	5,89	0,6591	11,19	5,18	6,88	1,70
TM2	120	7,69	0,7313	9,51	6,86	8,67	1,81
TM2	180	9,00	0,8406	9,34	8,08	10,01	1,93
TM5	10	5,35	2,1951	41,03	2,49	8,09	5,60
TM5	30	5,59	1,9649	35,15	3,05	8,09	5,04
TM5	60	4,78	1,7844	37,33	2,39	6,88	4,49
TM5	120	6,03	1,9447	32,25	3,36	8,41	5,05
TM5	180	4,77	1,4353	30,09	2,68	6,41	3,73

Fonte: Autora, 2026.

A Figura 45 apresenta o comportamento da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova de adobe submetidos aos tratamentos TC, TCB, TM2 e TM5 ao longo dos tempos de 10, 30, 60, 120 e 180 minutos. Observou-se uma tendência crescente de absorção em todos os tratamentos, principalmente nos instantes iniciais (10 e 30 min). Esse desempenho inicial rápido seguido por incremento gradual é típico de materiais porosos, nos quais a capilaridade domina o transporte de água nas primeiras etapas de umedecimento (Souza *et al.*, 2023).

Figura 45 - Comportamento da absorção por capilaridade em corpos de prova de adobe.



Fonte: Autora, 2026.

Os resultados apresentados indicam tendência de maior absorção de água no tratamento TM2 ao longo dos tempos avaliados, enquanto os tratamentos TM5 e TC apresentaram comportamento intermediário, sobretudo até aproximadamente 90 minutos de ensaio. Esse comportamento sugere que a incorporação de micélio pode ter influenciado a estrutura porosa do compósito, possivelmente relacionada a alterações na conectividade entre poros e na retenção hídrica do material.

Ao considerar especificamente os tratamentos com incorporação de micélio (TM2 e TM5), observou-se, na Figura 45, aumento progressivo da absorção de água ao longo do tempo em ambos os casos, comportamento característico de materiais porosos submetidos ao ensaio de capilaridade. Entretanto, nota-se tendência de menores valores de absorção no tratamento TM5 em comparação ao TM2 na maior parte dos tempos avaliados. Esses resultados sugerem que o aumento do teor de micélio pode estar associado à redução da absorção capilar do compósito, possivelmente em razão de modificações promovidas na microestrutura da matriz.

Estudos envolvendo biocompósitos à base de micélio relatam que o desenvolvimento das hifas pode atuar como agente ligante natural, promovendo maior integração entre as partículas do substrato e influenciando propriedades relacionadas à porosidade e à permeabilidade do material (Islam *et al.*, 2017). Nessa perspectiva, maiores teores de micélio podem favorecer a formação de uma rede micelial mais densa, potencialmente reduzindo a conectividade entre poros e, conseqüentemente, a absorção de água por capilaridade.

A tendência de maior absorção observada, especialmente no tratamento TM2, reforça a importância da análise da interação entre água e material em sistemas construtivos com terra crua. A presença de umidade está frequentemente associada à redução do desempenho e da durabilidade desses materiais, sendo reconhecida como um dos principais agentes de deterioração em edificações de terra (Ribeiro; Oliveira; Bracci, 2022).

De modo geral, os resultados obtidos sugerem que as diferentes composições investigadas podem influenciar o comportamento higroscópico do adobe, destacando a relevância do controle da absorção capilar na avaliação de compósitos sustentáveis destinados à construção civil.

4.7.1.1 Análise de variância (ANAVA)

O resultado da ANAVA com dados originais proporcionou um CV de 11,13% e, indicam efeito significativo ($p < 0,001$) dos tratamentos, dos tempos e da interação entre esses fatores, evidenciando que o comportamento da absorção de água depende simultaneamente do tipo de tratamento aplicado e do tempo de ensaio.

Segundo Hair *et al.*, (2019) e Montgomery (2020) o CV isoladamente, não garante atendimento aos pressupostos da ANAVA, especialmente em dados percentuais, dependentes do tempo e com tendência crescente, sendo necessária a avaliação da normalidade e homogeneidade de variâncias. Isso explica por que a análise de normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, realizada no Sisvar 5.8 (Ferreira, 2016), indicou violação da normalidade, justificando a necessidade de transformação dos dados.

Após a transformação Raiz ($Y+1$), observou-se redução significativa da variabilidade residual, com o CV indo de 11,13% para 4,39%, Tabela 22, atendendo plenamente aos pressupostos estatísticos.

Tabela 22 - Análise de variância da absorção de água com Transformação.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	3	3,515103	1,171701	107,586	0,0000
Tempo	4	14,460081	3,615020	331,931	0,0000
Tratamento x Tempo	12	0,523197	0,043600	4,003	0,0001
Erro	80	0,871269	0,010891		
Total corrigido	99	19,369650			
CV (%)	4,39				
Média geral:	2,3780672	Número de observções:		100	

Fonte: Autora, 2026.

Mesmo após a transformação, mantiveram-se altamente significativos ($p < 0,001$), Tratamento, Tempo e Interação Tratamento $\times$ Tempo, que demonstra que a resposta da absorção não é explicada apenas pelos efeitos isolados dos fatores, mas pela combinação entre eles.

Isso reforça que os efeitos observados não são artefatos estatísticos, mas refletem diferenças reais no comportamento físico dos tratamentos. Mostrando dessa forma que a transformação não alterou a significância dos efeitos, apenas aumentou a confiabilidade estatística sem alterar as conclusões biológicas. O padrão crescente de absorção e a interação significativa confirmam que a aplicação de micélio tem efeito cumulativo e diferenciado ao longo do tempo.

Dessa forma, é possível inferir aos resultados que a transformação Raiz (Y+1) é recomendada quando a variabilidade dos dados é alta e, que a interação Tratamento $\times$ Tempo deve ser considerada para interpretação adequada, evidenciando que o efeito do micélio é dependente do tempo de ensaio. Esses resultados reforçam a importância da análise fatorial, pois a resposta da absorção não depende apenas do tratamento ou do tempo isoladamente, mas da combinação entre ambos, justificando a avaliação da interação no modelo estatístico.

4.7.1.2 Teste de comparação de médias (Tukey 5%)

Constatada a significância da interação Tratamento $\times$ Tempo, procedeu-se à comparação de médias, Tabela 23, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para desdobramento de Tratamentos dentro de Tempo.

Tabela 23 - Teste de médias para Tratamento dentro de cada nível de Tempo

Tratamento	10	30	60	120	180
TC	1,91 a	2,92 b	4,07 a	5,05 a	5,92 a
TCB	1,73 a	2,06 a	3,46 a	5,67 a b	7,25 b
TM2	3,32 b	4,54 c	5,89 b	7,69 c	9,00 c
TM5	2,79 b	4,38 c	5,23 b	6,54 b	7,58 b

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Observou-se que, aos 10 minutos, os tratamentos TM2 e TM5 apresentaram maiores médias de absorção, diferindo estatisticamente dos tratamentos TC e TCB, que não diferiram entre si. Aos 30 minutos, TM2 e TM5 permaneceram estatisticamente semelhantes entre si e

superiores aos demais tratamentos, enquanto TC apresentou média intermediária e TCB os menores valores de absorção.

No tempo de 60 minutos, os tratamentos TM2 e TM5 continuaram formando o grupo de maiores médias, diferindo estatisticamente de TC e TCB, que permaneceram semelhantes entre si. Aos 120 minutos, verificou-se separação mais evidente entre os tratamentos, com TM2 apresentando a maior média de absorção, diferindo de TM5, TC e TCB. Nesse mesmo tempo, TM5 apresentou média intermediária, enquanto TC e TCB não diferiram estatisticamente entre si.

Aos 180 minutos, o tratamento TM2 apresentou a maior média de absorção, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. O tratamento TC apresentou a menor média, enquanto TM5 e TCB permaneceram estatisticamente semelhantes entre si e com valores intermediários de absorção.

Os resultados sugerem que os tratamentos contendo micélio apresentaram comportamento distinto em relação ao TC ao longo do ensaio de capilaridade. Em especial, o TM2 demonstrou maior absorção de água nos diferentes tempos avaliados, o que pode estar relacionado à maior conectividade capilar da matriz. Por outro lado, o TM5 apresentou comportamento intermediário, indicando que o aumento do teor de micélio pode ter influenciado a reorganização microestrutural do compósito, reduzindo parcialmente o transporte de água.

Materiais à base de micélio apresentam estrutura porosa e comportamento higroscópico, sendo a absorção de água diretamente influenciada pela distribuição e conectividade dos poros. Estudos indicam que alterações na formulação e no teor de micélio podem modificar propriedades como densidade, porosidade e transporte de umidade nesses compósitos (Alaneme *et al.*, 2023).

Assim, é possível que o menor teor de micélio no TM2 tenha favorecido a formação de uma rede capilar mais contínua, facilitando o avanço da umidade ao longo do ensaio. Em contrapartida, maiores teores de micélio podem promover maior integração entre partículas e alterações na microestrutura interna, reduzindo a absorção hídrica. Esse comportamento está de acordo com estudos que relacionam composição, microestrutura e desempenho físico em compósitos miceliais, destacando que fatores como substrato, espécie fúngica e processo de fabricação influenciam diretamente as propriedades funcionais do material (Lingam *et al.*, 2023). Resultados semelhantes também foram discutidos por Attias *et al.*, (2020) que relatam que o aumento do teor de micélio pode alterar a conectividade dos poros e modificar a cinética de absorção em períodos prolongados.

Para o desdobramento de Tempo dentro de Tratamentos (Tabela 24), observou-se aumento da absorção de água ao longo do tempo em todos os tratamentos avaliados. Entretanto, o comportamento estatístico desse incremento variou entre os tratamentos.

Tabela 24 - Teste de médias para Tempo dentro de cada nível de Tratamento.

Tempo	TC	TCB	TM2	TM5
10	1,91 a	1,73 a	3,32 a	2,79 a
30	2,92 b	2,06 a	4,54 b	4,38 b
60	4,07 c	3,46 b	5,89 c	5,23 b
120	5,05 d	5,67 c	7,69 d	6,54 c
180	5,92 d	7,25 d	9,00 e	7,58 c

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

No tratamento TC, verificou-se aumento significativo da absorção entre os tempos de 10, 30, 60 e 120 minutos. Contudo, os tempos de 120 e 180 minutos não diferiram estatisticamente entre si, indicando uma estabilização da absorção capilar ao final do ensaio. Comportamento semelhante foi observado no tratamento TM5, no qual os tempos de 30 e 60 minutos não diferiram estatisticamente, assim como os tempos de 120 e 180 minutos, sugerindo redução na taxa de absorção nos períodos finais do ensaio.

Para o tratamento TCB, os valores de absorção nos tempos de 10 e 30 minutos não apresentaram diferença estatística, enquanto os demais tempos diferiram entre si, indicando aumento progressivo da absorção ao longo do período avaliado. Já no tratamento TM2, todos os tempos diferiram estatisticamente entre si, evidenciando crescimento contínuo da absorção capilar durante todo o ensaio, sem indícios de estabilização até 180 minutos.

Esses resultados reforçam a interpretação de que a incorporação de micélio influenciou o comportamento higroscópico dos compósitos. Evidenciando e reforçando a interpretação biológica dos dados, indicando que a inserção de micélio a 2% (TM2) promove maior absorção de água ao longo do tempo devido à formação de uma rede micelial que aumenta a conectividade capilar (Appels *et al.*, 2019).

Por outro lado, o tratamento TM5 apresentou estabilização nos tempos finais, indicando que maiores teores de micélio podem ter promovido alterações microestruturais capazes de reduzir o avanço da água nos poros do material. Nesse contexto, a absorção capilar deve ser compreendida como um fenômeno dependente do tempo, caracterizado por uma fase inicial de absorção mais intensa, seguida por redução gradual da taxa de absorção e possível estabilização.

4.7.2 Absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão constitui um dos principais parâmetros para avaliação da durabilidade de materiais de construção à base de solo, como o adobe, uma vez que está diretamente relacionada à porosidade, à conectividade dos poros e à susceptibilidade à degradação por umidade. De acordo com a NBR 15270-2 (ABNT, 2023), menores valores de absorção indicam melhor desempenho físico e maior potencial de aplicação em elementos construtivos.

Neste contexto, será apresentada a análise estatística descritiva e inferencial dos resultados de absorção de água obtidos em corpos de prova de adobe submetidos a diferentes tratamentos e tempos de imersão.

A estatística descritiva, Tabela 25, evidenciou coeficientes de variação (CV) discrepantes entre os tratamentos e tempos avaliados, com valores variando de 1,68% (TCB) a 8,06% (TM2) para tempo de ensaio de 6h e 13,79% (TCB) a 33,72% (TM2) para o tempo de 24h. Destaca-se o elevado CV observado para o tratamento TM2 no tempo de 24h (33,72%), associado a uma média relativamente baixa (17,12%), indicando elevada dispersão relativa dos dados.

Tabela 25 - Estatística descritiva para a análise de absorção por imersão em CP de adobe.

Tratamento	Tempo (h)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Amplitude (%)
TC	6	23,23	1,7353	7,47	21,69	25,51	3,82
TC	24	19,05	2,7432	14,40	16,86	23,75	6,89
TCB	6	25,39	0,4266	1,68	24,80	25,92	1,12
TCB	24	22,76	3,1386	13,79	18,91	26,58	7,67
TM2	6	23,24	1,8731	8,06	20,12	24,77	4,65
TM2	24	17,12	5,7729	33,72	9,47	25,12	15,65
TM5	6	10,55	0,7385	7,00	9,83	11,61	1,78
TM5	24	8,84	2,2073	24,97	6,21	11,90	5,69

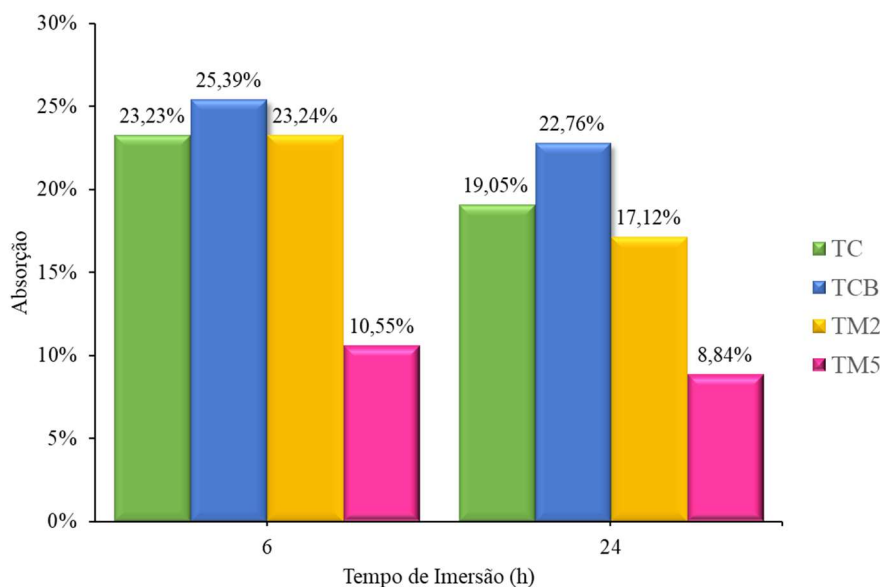
Fonte: Autora, 2026.

Considerando a heterogeneidade desses parâmetros e uma elevada amplitude absoluta, os dados sugerem que a variabilidade entre repetições é significativa. Isso justifica a necessidade de uma transformação de dados para atender aos pressupostos de normalidade e homogeneidade da ANAVA, e garantir sua validade (Nascimento *et al.*, 2024).

A Figura 46 apresenta o comportamento da absorção de água por imersão dos corpos de prova de adobe submetidos aos tratamentos TC, TCB, TM2 e TM5 nos tempos de 6 e 24 horas. Observa-se que o tratamento TM5 apresentou os menores valores de absorção em ambos os

tempos de ensaio, com 10,55% em 6h e 8,84% em 24h, indicando uma tendência de redução da absorção de água em relação aos demais tratamentos. Além disso, nota-se diminuição dos valores de absorção entre 6h e 24h para todos os tratamentos avaliados. Entretanto, como ainda não foi realizado teste estatístico de comparação de médias, não é possível afirmar se as diferenças observadas são estatisticamente significativas.

Figura 46 - Comportamento da absorção por imersão em corpos de prova de adobe.



Fonte: Autora, 2026.

4.7.2.1 Análise de variância (ANAVA)

A ANAVA com dados originais evidenciou efeito significativo ($p < 0,001$) para os fatores Tratamento e Tempo, indicando que tanto a composição dos tratamentos quanto o período de imersão influenciaram a absorção de água. Por outro lado, a interação Tratamento $\times$ Tempo não foi significativa, sugerindo que os tratamentos responderam de forma paralela ao longo dos tempos analisados.

Resultados equivalentes foram obtidos após transformação, confirmando a robustez das conclusões estatísticas. A ausência de interação significativa indica que as diferenças entre tratamentos são consistentes ao longo do tempo, permitindo interpretar efeitos principais isoladamente.

Além disso, materiais miceliais apresentam comportamento dependente da hidratação ambiental, o que reforça a relação entre estrutura biocompósita e absorção hídrica observada experimentalmente (Walter; Gürsoy, 2022).

A verificação dos pressupostos indicou violação da normalidade residual, justificando a transformação raiz ($Y+1$), que reduziu o coeficiente de variação de 14,93% para 7,55%, conforme ANAVA apresentada na Tabela 26. A elevada amplitude observada em alguns tratamentos, especialmente TM2 em 24h, evidenciou heterogeneidade experimental, indicando maior dispersão entre os valores obtidos. Isso demonstra ganho significativo de precisão experimental e melhor adequação aos pressupostos estatísticos.

Esse comportamento indica que a transformação atuou como ferramenta estatística de ajuste, e não como fator de distorção dos resultados experimentais.

Tabela 26 - Análise de variância da absorção de água com transformação Raiz ($Y+1$).

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	3	17,762907	5,920969	54,105	0,0000
Tempo	1	1,818151	1,818151	16,614	0,0003
Tratamento x Tempo	3	0,317036	0,105679	0,966	0,4209
Erro	32	3,501938	0,109436		
Total corrigido	39	23,400032			
CV (%)	7,55				
Média geral:	4,3805250	Número de observções:		40	

Fonte: Autora, 2026.

4.7.2.2 Teste de comparação de médias (Tukey 5%)

A análise de variância previamente apresentada indicou que a interação entre os fatores tratamento e tempo de imersão não foi estatisticamente significativa, evidenciando que o comportamento relativo dos tratamentos se mantém consistente ao longo do tempo avaliado. Assim, a ausência de interação sugere independência entre os fatores, permitindo interpretar os efeitos principais separadamente. Ainda assim, procedeu-se ao desdobramento das médias por meio do teste de Tukey a 5% de probabilidade com finalidade descritiva e exploratória, prática recomendada para detalhar tendências experimentais mesmo quando a interação não é significativa (Montgomery, 2020).

A comparação das médias entre tratamentos para cada tempo (Tabela 27) mostra que, em 6h, o tratamento TM5 apresentou a menor média de absorção de água (10,55%), diferindo estatisticamente de todos os demais tratamentos (TC, TCB e TM2), os quais não diferiram entre si. Esse resultado indica maior estabilidade hídrica do TM5 nas primeiras horas de imersão.

No tempo de 24h, o tratamento TCB apresentou a maior média de absorção (22,76%), enquanto TM5 manteve os menores valores (8,84%). Observou-se que TM5 diferiu

estatisticamente de todos os demais tratamentos. Além disso, TCB diferiu de TM2 e TM5, mas não diferiu de TC. Da mesma forma, TM2 não diferiu de TC.

Portanto, a comparação entre TC e TM5 demonstrou diferença estatística significativa em 24h, indicando maior absorção hídrica do TC em relação ao TM5. Esse resultado reforça que TM5 apresentou maior resistência à absorção de água ao longo do período avaliado.

Esse comportamento sugere que os tratamentos TC, TCB e TM2 apresentam maior conectividade porosa e, conseqüentemente, maior capacidade de captação de água quando comparados ao TM5. A presença de micélio no TM2 e o caldo de batata no TCB podem ter favorecido modificações microestruturais capazes de ampliar a permeabilidade do material, enquanto o TC apresentou comportamento intermediário, porém semelhante aos tratamentos com maiores índices de absorção. Em contrapartida, o TM5 apresentou estrutura menos suscetível à infiltração, evidenciando menor absorção hídrica e maior estabilidade frente à exposição à água.

Esse resultado sugere que os mecanismos iniciais de absorção estão mais associados ao preenchimento de poros superficiais e à captação hídrica inicial do material do que exclusivamente às diferenças composicionais entre os tratamentos, conforme discutido em estudos sobre materiais à base de terra por Vašatko *et al.*, (2022).

Tabela 27 - Desdobramento de Tratamento dentro de cada nível de Tempo.

Tratamento	6 h	24 h
TC	23,23 b	19,05 b c
TCB	25,39 b	22,76 c
TM2	23,24 b	17,12 b
TM5	10,55 a	8,84 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Entretanto, como a interação global não foi significativa, essas diferenças devem ser interpretadas com cautela e entendidas como variações pontuais entre médias, e não como alteração sistemática do efeito do tratamento ao longo do tempo. Tais variações podem estar associadas à heterogeneidade microestrutural e à sensibilidade dos materiais terrosos à saturação prolongada (Vimieiro *et al.*, 2023).

A avaliação do fator tempo dentro de cada tratamento (Tabela 28) mostrou diferença significativa entre os tempos de 6 e 24h para os tratamentos TC e TM2. Em ambos os casos, os

valores médios observados após 24h foram inferiores aos registrados em 6h. Para os tratamentos TCB e TM5, não houve diferença estatística significativa entre os tempos avaliados.

Esse comportamento pode estar associado ao equilíbrio higroscópico do material e à saturação inicial dos poros, especialmente em compósitos biológicos cuja rede fibrosa influencia os mecanismos de difusão e retenção hídrica, conforme relatado por Hatkar e Lanke (2022). Entretanto, considerando que os valores em 24h foram inferiores aos de 6h, é possível que tenham ocorrido fenômenos adicionais, como desprendimento superficial de partículas, rearranjos microestruturais ou variações associadas à estabilidade do material durante a imersão prolongada.

Essas observações estão alinhadas ao comportamento esperado em ensaios normalizados de absorção, nos quais propriedades físicas e microestruturais influenciam diretamente a retenção de água em materiais cerâmicos e terrosos, conforme diretrizes da NBR 15270-2 (ABNT, 2023).

Tabela 28 - Desdobramento de Tempo dentro de cada nível de Tratamento.

Tempo	TC	TCB	TM2	TM5
6 h	23,23 b	25,39 a	23,24 b	10,55 a
24 h	19,05 a	22,76 a	17,12 a	8,84 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Para o tratamento TM2, observou-se diferença significativa entre os tempos avaliados, indicando alteração do comportamento hídrico ao longo da imersão. Contudo, como não houve interação significativa entre os fatores tratamento e tempo, esse resultado deve ser interpretado como uma variação pontual entre médias e não como evidência de dependência estatística entre os fatores. Essa variação pode estar associada a rearranjos microestruturais ou à perda superficial de partículas durante a saturação contínua, fenômeno descrito para materiais terrosos por Vimieiro *et al.*, (2023).

Além disso, no TM2, a atuação do micélio pode ter contribuído para processos de biocimentação, promovendo preenchimento parcial dos poros e alterações na conectividade capilar. Resultados semelhantes são relatados por Elsacker *et al.*, (2020), que destacam a eficiência de biocompósitos à base de micélio na melhoria das propriedades físicas e de durabilidade.

Considerando que a absorção de água é um parâmetro fundamental para avaliação da qualidade física dos materiais, o TM5 apresentou o desempenho mais estável, especialmente

após 24h de imersão, mantendo os menores valores médios de absorção entre os tratamentos avaliados.

4.8 Perda de massa em absorção de água por imersão

4.8.1 Precisão experimental e pressupostos estatísticos

A análise descritiva dos dados de perda de massa em absorção de água por imersão, Tabela 29, revelou elevada variabilidade experimental em determinados tratamentos e tempos de ensaio. Destacam-se: TCB - 24h (CV = 55,29%; amplitude = 8,42%); TM2 - 24h (CV = 48,71%; amplitude = 14,09%) e TM2 - 6h (CV = 48,09%; amplitude = 5,82%).

Tabela 29 - Estatística descritiva para a perda de massa por imersão em CP de abobe.

Tratamento	Tempo (h)	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Amplitude (%)
TC	6	3,08	0,4521	14,68	2,71	3,86	1,15
TC	24	6,91	2,0999	30,39	3,67	9,01	5,34
TCB	6	1,81	0,4500	24,86	1,27	2,24	0,97
TCB	24	6,64	3,6713	55,29	2,22	10,64	8,42
TM2	6	4,61	2,2169	48,09	2,60	8,42	5,82
TM2	24	10,76	5,2412	48,71	3,30	17,39	14,09
TM5	6	3,31	0,8652	26,14	2,64	4,76	2,12
TM5	24	3,80	0,7364	19,38	3,13	4,62	1,49

Fonte: Autora, 2026.

A associação entre elevados coeficientes de variação e amplitudes amplas indica dispersão significativa dos dados, sugerindo possível violação da homogeneidade de variâncias, pressuposto essencial da análise de variância, justificando transformações matemáticas para garantir a sua validade (Nascimento *et al.*, 2024).

Em materiais terrosos, tal comportamento é frequentemente associado à heterogeneidade estrutural, variações na porosidade e distribuição granulométrica, que influenciam diretamente o transporte capilar de água (Casnedi *et al.*, 2020).

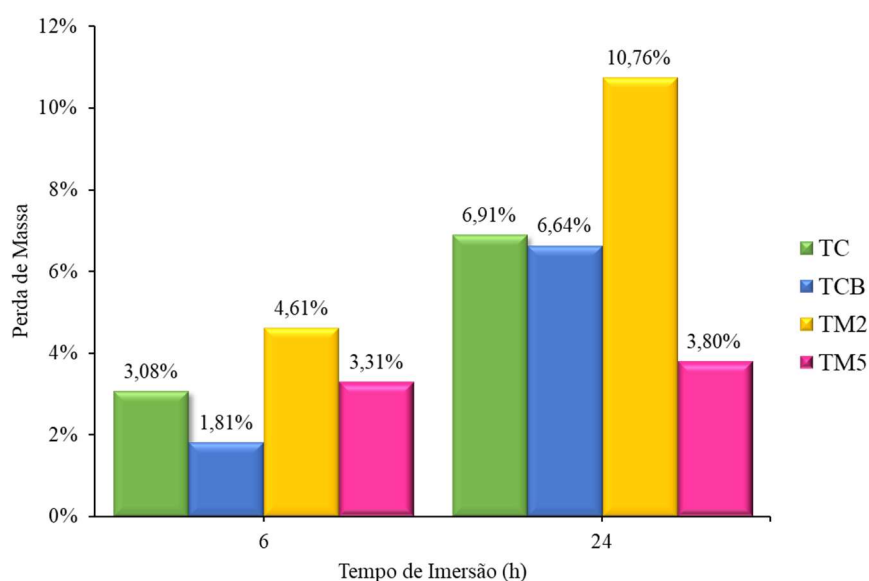
Estudos demonstram que compósitos à base de solo podem apresentar elevada variabilidade hidráulica devido à conectividade de poros e microfissuração interna, o que reforça a necessidade de verificação prévia dos pressupostos estatísticos antes da aplicação de modelos paramétricos (Anssa-Asare *et al.*, 2024).

Assim, a estatística descritiva forneceu evidências iniciais que justificaram a avaliação formal da normalidade e homogeneidade das variâncias.

A Figura 47 apresenta os valores de perda de massa dos corpos de prova de adobe submetidos aos tratamentos TC, TCB, TM2 e TM5 durante o ensaio de absorção de água por imersão nos tempos de 6 e 24 horas. De modo geral, observou-se tendências de aumento da perda de massa em 24h de imersão para todos os tratamentos avaliados, indicando maior degradação do material com o prolongamento da exposição à água.

Entre os tratamentos, o TM2 apresentou tendências de maiores valores de perda de massa em ambos os tempos, com aumento mais acentuado em 24h, sugerindo maior susceptibilidade à desagregação durante a imersão prolongada.

Figura 47 – Perda de massa no ensaio de imersão em corpos de prova de adobe.



Fonte: Autora, 2026.

Os tratamentos TC e TCB também apresentaram tendência de aumento da perda de massa ao longo do tempo, indicando maior suscetibilidade à ação prolongada da água. Em relação ao TM5, observa-se uma tendência de menor perda de massa no período de 24h, bem como menor variação em relação ao tempo inicial, o que sugere maior estabilidade do material frente à imersão prolongada, quando comparado aos demais tratamentos.

4.8.2 Análise de variância (ANAVA)

Para avaliação das pressuposições de normalidade dos resíduos, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk no software Sisvar 5.8 (Ferreira, 2016), o qual indicou violação da suposição de normalidade. Nesse contexto, foi aplicada a transformação Raiz ($Y+1$), que é uma abordagem

recomendada em dados de porcentagem com valores baixos e assimétricos (Nascimento *et al.*, 2024).

Após transformação, o CV caiu de 49,82% para 18,73%, mostrando uma redução substancial da variabilidade relativa. Esse ajuste permitiu uma análise mais robusta e confiável, Tabela 30, visto que o modelo passou a atender aos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variância.

Com a transformação, manteve-se a significância para os fatores principais Tratamento e Tempo ($p < 0,001$), confirmando os efeitos individuais desses fatores na perda de massa. E a interação Tratamento $\times$ Tempo permaneceu não significativa ($p = 0,1008$).

Os resultados indicam que os tratamentos diferem na capacidade de estabilização do adobe, influenciando a resistência à absorção de água, principalmente quando considerados os diferentes tempos de imersão.

Tabela 30 - ANAVA de perda de massa por imersão com transformação Raiz (Y+1).

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	3	3,171335	1,057112	5,277	0,0045
Tempo	1	5,335041	5,335041	26,632	0,0000
Tratamento x Tempo	3	1,356138	0,452046	2,257	0,1008
Erro	32	6,410464	0,200327		
Total corrigido	39	16,272378			
CV (%)	18,73				
Média geral:	2,3892835	Número de observções:		40	

Fonte: Autora, 2026.

4.8.3 Teste de comparação de médias (Tukey 5%)

A análise de variância realizada para a variável perda de massa por imersão indicou que não houve interação significativa entre os fatores Tratamento e Tempo.

Entretanto, mesmo na ausência de interação significativa, o desdobramento dos fatores pode ser realizado como estratégia complementar de análise, com o objetivo de explorar o comportamento das médias dentro de cada nível dos fatores avaliados. Essa abordagem permite identificar tendências de resposta e compreender de forma mais detalhada o comportamento experimental dos tratamentos ao longo do tempo.

De acordo com a literatura estatística, o desdobramento de fatores em experimentos fatoriais pode ser utilizado como ferramenta exploratória para auxiliar na interpretação biológica ou tecnológica dos resultados. Ação necessária para compreender possíveis padrões

de comportamento entre níveis dos fatores que não são completamente evidenciados apenas pelos efeitos principais da análise de variância (Montgomery, 2020).

A comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% permitiu avaliar o comportamento da perda de massa por imersão nos diferentes tratamentos e tempos de ensaio.

Tabela 31 - Desdobramento de Tratamento dentro de cada nível de Tempo.

Tratamento	6	24
TC	3,08 a	6,91 a b
TCB	1,81 a	6,64 a b
TM2	4,61 a	10,76 b
TM5	3,31 a	3,80 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Na análise dos Tratamentos dentro de cada nível de Tempo, Tabela 31, observa-se que não houve diferença estatística entre os tratamentos no tempo de 6 horas. Esse resultado indica que, no período inicial de imersão, a perda de massa ocorreu de forma semelhante entre os diferentes compósitos avaliados.

No tempo de 24 horas, o tratamento TM2 apresentou a maior perda de massa (10,76%), enquanto o TM5 apresentou o menor valor (3,80%), sendo esses tratamentos estatisticamente diferentes entre si. Os tratamentos TC (6,91%) e TCB (6,64%) apresentaram comportamento intermediário e não diferiram estatisticamente entre si, nem em relação aos tratamentos TM2 e TM5. Considerando que menores valores de perda de massa indicam melhor desempenho, o tratamento TM5 apresentou o menor valor numérico e tendência de maior estabilidade do material, embora não tenha diferido estatisticamente dos tratamentos TC e TCB.

Esse comportamento é consistente com pesquisas que demonstram que compósitos miceliais com maior densidade de hifas apresentam maior resistência à degradação hídrica, pois a rede micelial atua como reforço estrutural capaz de restringir a mobilização de partículas minerais do substrato (Zhang *et al.*, 2022b).

Por outro lado, o tratamento TM2, com menor quantidade de micélio, possivelmente não desenvolveu uma rede micelial suficientemente contínua para reforçar adequadamente a matriz do compósito. Nesse caso, o micélio pode ter atuado apenas parcialmente como agente ligante, não sendo capaz de reduzir significativamente a porosidade ou a conectividade entre os poros do material. Como consequência, o material apresentou maior suscetibilidade à lixiviação de partículas durante o ensaio de imersão, refletindo na maior perda de massa observada.

Esse resultado evidencia que, em períodos mais prolongados de exposição à água, as diferenças estruturais entre os tratamentos tornam-se mais evidentes, afetando a estabilidade do material.

Na análise do fator Tempo dentro de cada Tratamento, Tabela 32, verificou-se aumento significativo da perda de massa entre 6 e 24 horas para os tratamentos TC, TCB e TM2, indicando que a exposição prolongada à água favorece a lixiviação de partículas da matriz do adobe.

Tabela 32 - Desdobramento de Tempo dentro de cada Tratamento.

Tempo	TC	TCB	TM2	TM5
6 h	3,08 a	1,81 a	4,61 a	3,31 a
24 h	6,91 b	6,64 b	10,76 b	3,80 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Por outro lado, para o tratamento TM5, não foi observada diferença estatística entre os tempos de imersão, indicando que a perda de massa permaneceu estatisticamente estável ao longo do período avaliado.

Esse comportamento indica que o tratamento TM5 apresentou maior resistência à degradação hídrica, uma vez que a perda de massa permaneceu estatisticamente constante mesmo após o aumento do tempo de imersão.

Uma possível explicação para esse comportamento está relacionada ao processo de colonização micelial e à formação da rede de hifas no interior do compósito. O micélio consiste em uma estrutura filamentosa formada por hifas que se desenvolvem através do substrato, promovendo interligação entre partículas e contribuindo para a coesão estrutural do material. Esse processo pode resultar em uma estrutura interna relativamente estável frente à ação da água, reduzindo a mobilidade de partículas e a desagregação do material durante a imersão (Alaneme *et al.*, 2023).

4.9 Análise de absorção de água - Capilaridade × Imersão

Os resultados anteriores obtidos, demonstraram que as propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova de adobe foram influenciadas pela modificação composicional dos tratamentos, refletindo-se nas propriedades dimensionais, em parâmetros como retração, resistência mecânica e absorção capilar ao longo do tempo.

Dessa forma, a análise integrada do comportamento em condição limite de ensaio, capilaridade máxima (180 min) e imersão prolongada (24h), permite consolidar a interpretação global do desempenho hídrico dos materiais.

4.9.1 Precisão experimental e pressupostos estatísticos

Os dados médios de absorção de água por tratamento e método de absorção estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Estatística descritiva do ensaio de Capilaridade × Imersão em CP de abobe.

Tratamento	Método	Média (%)	DP (%)	CV (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Amplitude (%)
TC	Capilaridade	5,92	0,5612	9,48	5,23	6,45	1,22
TC	Imersão	19,05	2,7432	14,40	16,86	23,75	6,89
TCB	Capilaridade	7,25	0,7373	10,17	6,45	8,39	1,94
TCB	Imersão	22,76	3,1386	13,79	18,91	26,58	7,67
TM2	Capilaridade	9,00	0,8406	9,34	8,08	10,01	1,93
TM2	Imersão	17,12	5,7729	33,72	9,47	25,12	15,65
TM5	Capilaridade	7,58	0,8762	11,56	6,41	8,41	2,00
TM5	Imersão	8,84	2,2073	24,97	6,21	11,90	5,69

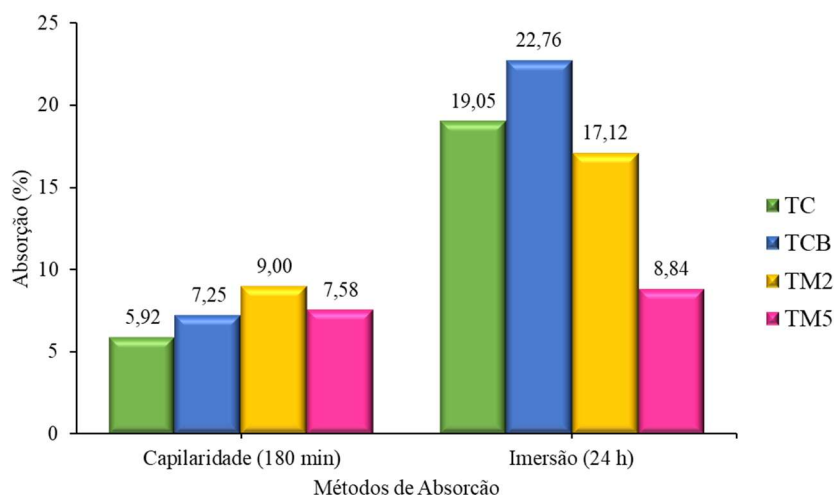
Fonte: Autora, 2026.

A estatística descritiva permitiu caracterizar a variabilidade dos dados obtidos nos diferentes tratamentos e métodos de ensaio. Os parâmetros de dispersão, representados pelo desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e amplitude absoluta, evidenciaram diferenças na variabilidade entre os grupos experimentais. De modo geral, os ensaios de imersão apresentaram maiores valores de dispersão em comparação aos ensaios de capilaridade, destacando-se o tratamento TM2 sob imersão, que apresentou CV de 33,72% e amplitude absoluta de 15,65%. Esse comportamento é coerente com a literatura técnica, uma vez que a imersão prolongada favorece a saturação progressiva dos poros e microfissuras, promovendo maior incorporação de água em materiais terrosos (Yari *et al.*, 2025).

A dispersão relativa dos dados variou de 9,34% a 33,72%, sendo classificada como moderada a alta segundo Nascimento *et al.*, (2024). Esses resultados constituem indícios exploratórios de possível comprometimento dos pressupostos da análise de variância (ANAVA), conforme discutido por Knief e Forstmeier (2021), o que justifica a necessidade de transformação para atender à normalidade estatística.

A representação gráfica das médias de absorção de água, Figura 48, evidencia as diferenças consistentes entre os métodos de ensaio e entre os tratamentos avaliados, permitindo complementar a interpretação da estatística descritiva, previamente realizada.

Figura 48 - Absorção média em ensaio de Capilaridade × Imersão em CP de abobe.



Fonte: Autora, 2026.

Observa-se que, independentemente do tratamento, há uma tendência de maiores valores numéricos no método de imersão (24h) em comparação ao método de capilaridade (180 min), sugerindo maior incorporação de água quando o material é submetido à saturação direta.

A utilização combinada de métodos é recomendada para caracterização abrangente de materiais de construção, pois fornece visão integrada do comportamento hídrico em diferentes escalas de solicitação (Lu; Wang, 2020).

4.9.2 Análise de Variância (ANAVA)

A análise de variância sem transformação indicou que todos os fatores foram altamente significativos ($p < 0,001$), indicando que capilaridade e imersão apresentam diferenças marcantes na absorção de água. Por sua vez, sendo a interação Tratamento × Método significativa, evidencia-se que o efeito do tratamento depende do método de ensaio.

No entanto o CV global sem transformação foi de 22,07%, considerado alto para experimentos de absorção de água em materiais de construção (Vimieiro *et al.*, 2023). Isso indica heterogeneidade nas medições e necessidade de transformação para uma análise robusta.

A Tabela 34, mostra ANAVA com a transformação Raiz ($Y+1$). Houve uma redução expressiva do CV de 22,07% para 9,29% o que confirma estabilização da variância e maior

precisão experimental, validando a interpretação estatística (Knief; Forstmeier, 2021). Portanto, a discussão deve ser baseada nos dados transformados.

Tabela 34 - ANAVA para Capilaridade $\times$ Imersão com transformação Raiz (Y+1).

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	3	3,956197	1,318732	12,238	0,0000
Método	1	16,167912	16,167912	150,046	0,0000
Tratamento x Método	3	5,141008	1,713669	15,904	0,0000
Erro	32	3,448089	0,107753		
Total corrigido	39	28,713206			
CV (%)	9,29				
Média geral:	3,5315605	Número de observações:		40	

Fonte: Autora, 2026.

4.9.3 Teste de comparação de médias (Tukey 5%)

A análise do desdobramento de Tratamentos dentro de Métodos, encontra-se na Tabela 35. Para capilaridade os tratamentos TC, TCB, TM2 e TM5 não diferem estatisticamente após transformação, indicando absorção similar em 180 min e, que a inserção de micélio ou caldo de batata não alterou significativamente a absorção capilar no tempo máximo do ensaio. Isso sugere que, no regime de ascensão capilar, a estrutura porosa superficial apresentou comportamento semelhante entre formulações.

Pode-se inferir tendência de melhor desempenho para TC, por apresentar o menor valor médio, indicando menor intensidade do fenômeno capilar. Entretanto, essa superioridade deve ser tratada apenas como indicativa, não estatisticamente confirmada.

Tabela 35 - Desdobramento de Tratamentos dentro de cada Método.

Tratamento	Capilaridade	Imersão
TC	5,92 a	19,05 b c
TCB	7,25 a	22,76 c
TM2	9,00 a	17,12 b
TM5	7,58 a	8,84 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Na imersão por 24 horas, observou-se diferenças nos valores médios de absorção de água entre os tratamentos. O tratamento TM5 apresentou o menor valor médio (8,84%) e diferiu estatisticamente dos demais tratamentos. O tratamento TCB apresentou o maior valor médio

(22,76%), diferindo de TM2 (17,12%), enquanto o tratamento TC (19,05%) apresentou comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente de TCB e TM2.

Considerando que menores valores de absorção indicam melhor desempenho, o tratamento TM5 demonstrou maior estabilidade hídrica sob imersão prolongada. Esse resultado indica que maiores teores de micélio promovem reorganização da matriz porosa, possivelmente reduzindo conectividade capilar interna, conforme relatado em compósitos miceliais recentes (Islam *et al.*, 2018).

Adicionalmente, observaram-se diferenças significativas entre TM2 e TM5, indicando que o aumento do teor de micélio contribuiu para a redução da absorção de água após 24 horas. Esse comportamento pode estar associado à modificação microestrutural da matriz terrosa, com possível redução da conectividade efetiva dos poros e maior estabilidade hídrica do compósito (Motamedi; Rousse; Promis, 2025). A literatura aponta que a incorporação de agentes fibrosos ou biológicos pode alterar a distribuição e a continuidade capilar em materiais terrosos, influenciando diretamente a absorção sob saturação prolongada (Attias *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2017).

O desdobramento analisado de Métodos dentro de Tratamentos, encontra-se na Tabela 36. A comparação entre métodos indicou diferenças significativas para todos os tratamentos avaliados, com exceção do TM5. Em todos os casos, o ensaio de capilaridade apresentou médias inferiores às observadas no ensaio de imersão, demonstrando menor intensidade de absorção de água nesse regime experimental. O TM5 demonstrou estabilidade hídrica semelhante nos dois regimes de ensaio, sugerindo maior resistência à saturação.

Tabela 36 - Desdobramento de Métodos dentro de cada Tratamento.

Tempo	TC	TCB	TM2	TM5
Capilaridade	5,92 a	7,25 a	9,00 a	7,58 a
Imersão	19,05 b	22,76 b	17,12 b	8,84 a

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autora, 2026.

Isso indica que o regime de saturação total promove maior absorção do que o transporte capilar, resultado esperado em função dos mecanismos físicos distintos de entrada de água no material. A capilaridade depende de gradientes de sucção e ocorre progressivamente, enquanto a imersão promove saturação direta dos vazios acessíveis. Dessa forma, a imersão constitui uma condição mais severa de exposição hídrica, pois promove maior saturação do material quando comparada ao transporte capilar, permitindo identificar limitações relacionadas à porosidade e

conectividade dos poros que podem não ser detectadas apenas em ensaios de capilaridade (Wang *et al.*, 2021).

A superioridade do método capilaridade (menores valores) não representa necessariamente melhor condição experimental, mas evidencia que o ensaio de imersão impõe solicitação hídrica mais severa, revelando diferenças microestruturais não captadas em condições capilares. Esse resultado reforça a complementaridade entre métodos experimentais na avaliação tecnológica de materiais porosos, indicando que a interpretação isolada de um único ensaio pode levar a conclusões incompletas sobre o desempenho hídrico global.

Os elevados valores de absorção por imersão em TC (19,05 %) e TCB (22,76 %) indicam maior vulnerabilidade à degradação por umidade, fator crítico para materiais terrosos segundo pesquisas sobre absorção capilar e imersão prolongada (Wang *et al.*, 2021). Coerentes com essas informações, nos resultados alcançados no ensaio de perda de massa em imersão (24h), as maiores perdas ocorreram para TC (6,91 %) e TCB (6,64 %).

Enquanto o TM2 ainda apresenta elevada absorção sob imersão (17,12%), sugerindo poros interconectados e maior vulnerabilidade à saturação, o TM5 com (8,84%) demonstrou comportamento mais estável e maior resistência à penetração de água em condição de exposição prolongada. Além disso, no tratamento TM5, não foi observada diferença estatística significativa entre os métodos de capilaridade e imersão, indicando comportamento hídrico semelhante entre os métodos de absorção avaliados.

Assim, o TM5 evidencia uma matriz estrutural mais equilibrada e menos sensível às diferentes formas de entrada de água, indicando potencial avanço tecnológico para a aplicação de adobe com micélio.

5 CONCLUSÃO

O trabalho demonstrou, que o solo empregado atende aos requisitos de aptidão para adobe, definidos pela NBR 16814 (ABNT, 2020) com granulometria 62% areia, 13% silte, 25% argila; baixa plasticidade; predominância de caulinita, assegurando estabilidade volumétrica e moldabilidade adequadas. A incorporação de micélio revelou mérito técnico e ambiental: o compósito com 5% (TM5) alcançou a maior resistência à compressão (1,23 MPa, que supera em 27% o valor do tratamento TC), além do melhor desempenho hídrico (absorção em capilaridade a 180 min de 7,58%, e por imersão em 24h de 8,84% com menor perda de massa de 3,80%), resultados consistentes com a hipótese de bioconsolidação e aderentes ao propósito de economia circular e ODS. Embora o limite normativo de 1,5 MPa NBR 16814 (ABNT,

2020) não tenha sido atingido, os resultados do TM5 frente ao controle e aos demais tratamentos, somado ao rigor metodológico (conformidade de ensaios, ANAVA e Tukey), sustenta um bom desempenho e evidencia um caminho de otimização (ajuste granulométrico/argila, densificação, cura e tratamentos de superfície) para futura elegibilidade estrutural. Em síntese, a pesquisa oferece contribuição original ao consolidar evidências de que o micélio pode elevar simultaneamente o desempenho mecânico e a resistência à degradação hídrica de adobes, sem descaracterizar sua natureza de baixo impacto, reforçando a viabilidade de biocompósitos de terra crua em aplicações sustentáveis contemporâneas.

REFERÊNCIAS

- ABDELHADY, O.; SPYRIDONOS, E.; DAHY, H. 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. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/designs7010020>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- ADAPT. **Mycelium**: The Underground Network Powering Health and Nature. 2025. Fotografia. Disponível em: <https://www.adapt drinks.co.uk/blogs/blog/mycelium-the-underground-network-powering-health-and-nature?srsId=AfmBOop4KjppZ-DgPPvme73rrNFLwFM1ekM9diSMnM1aDptFdZo9wOwY>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- ADISESHAN, A.; OMKUMAR, M. A review on composites: selection and its applications. *Materials Today: Proceedings*, 2024. DOI: 10.1016/j.matpr.2024.06.014. Acesso em: 14 set. 2025.
- ALANEME, K. K.; ANAELE, J. U.; OKE, T. M.; KAREEM, S. A.; ADEDIRAN, M.; AJIBUWA, O. A.; ANABARANZE, Y. O. Mycelium based composites: a review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications. **Alexandria Engineering Journal**, [S.l.], v. 83, p. 234-250, nov. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.012>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- ALEMU, D.; TAFESSE, M.; MONDAL, A. K. Mycelium-Based Composite: The Future Sustainable Biomaterial. *International Journal of Biomaterials*, 2022, Art. 8401528. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijbm/2022/8401528/>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- ALFONSO, P.; PENEDO, L. A.; GARCÍA-VALLES, M.; MARTÍNEZ, S.; TRUJILLO, J. E. Thermal behaviour of kaolinitic raw materials from San José (Oruro, Bolivia). **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, p. 5413–5421, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-022-11245-3>. Acesso em 4 mar. 2025.
- ALMEIDA, G. C. P. de. **Caracterização física e classificação dos solos**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes, 2005. 145 p. Apostila.
- ALVAREZ, B. S.; HERRERA ROSAS, M.; CAYO CHILENO, N. G.; AQUINO ROCHA, J. H. Resistência à compressão e absorção de blocos de solo-cimento com resíduos de PET. In: **IX Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção**, v. 9, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.46421/enarc.v9i1.6768>. Acesso em: 9 nov. 2025.
- ANSSA-ASARE, R. J.; RAZAKAMANANTSOA, A. R.; HAMARD, E.; DUC, M.; CAZACLIU, B.; VERRON, L. Impact of earth variability and implementation processes on hydromechanical and microstructure properties of sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**, v. 417, p. 135303, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135303>. Acesso em: 10 out. 2025.

APPELS, F. V. W.; DIJKSTERHUIS, J.; LUKASIEWICZ, C. E.; JANSEN, K. M. B.; WÖSTEN, H. A. B.; KRIJGSHELD, P. Hydrophobin gene deletion and environmental growth conditions impact mechanical properties of mycelium by affecting the density of the material. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 1-7, 16 mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23171-2>. Acesso em: 18 mar. 2024.

APPELS, F. V. W.; CAMERE, S.; MONTALTI, M.; KARANA, E.; JANSEN, K. M. B.; DIJKSTERHUIS, J.; KRIJGSHELD, P.; WÖSTEN, H. A. B. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. **Materials & Design**, [S.l.], v. 161, p. 64-71, jan. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>. Acesso 15 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7500-1**: Materiais metálicos - Calibração e verificação de máquinas de ensaio estático uniaxial - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração e verificação do sistema de medição de força. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9513**: Materiais metálicos - Dispositivos extensométricos - Verificação da calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos — Parte 2: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural — Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7250**: Identificação e Descrição de Amostras de Solo em Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7183**: Determinação do Limite e Relação de Contração dos Solo. Método de Ensaio. ABNT, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16814**: Adobe - Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ATTIAS, N.; DANAI, O.; ABITBOL, T.; TARAIZI, E.; EZOV, N.; PEREMAN, I.; GROBMAN, Y. J. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: comparative review and experimental analysis. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 246, p. 119037, fev. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119037>. Acesso em: 21 set. 2025.

BAILLY, G. C.; EL MENDILI, Y.; KONIN, A.; KHOURY, E. **Advancing earth-based construction**: A comprehensive review of stabilization and reinforcement techniques for adobe and compressed earth blocks. *Eng*, v. 5, n. 2, p. 750-783, 2024. DOI: 10.3390/eng5020041. Acesso em: 5 mai. 2025.

BARROS, J. G.; LOPES, J. N. P.; LEITE, L. L.; MACIEL, J. K. V. S.; ARRUDA, T. R.; BATISTA, Y. B. G.; BANDEIRA, D. J. A.; OLIVEIRA, H. W. G. S. Viabilidade do uso de fibras vegetais para construções sustentáveis: uma revisão. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 21, n. 11, p. 19754–19771, nov. 2023. DOI: 10.55905/oelv21n11-063. Acesso em: 10 mai. 2025.

BAS, F. J.; GONZÁLEZ-CALDERÓN, H.; KUNZE, S.; BURBANO-GARCÍA, C.; SANDOVAL, C. Waste-based natural fiber reinforcement of adobe mixtures: Physical, mechanical, damage and durability performance assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, 122806, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122806>. Acesso em: 22 set. 2025.

BASU, D.; MUSHTAQ, S. M.; SHARMA, S.; TRIPATHI, S. Enhancing quality control in the mix design of high-strength concrete using a capacity-based approach. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 18, art. 722, 2024. DOI: 10.1186/s40069-024-00722-8. Acesso em 20 set. 2025.

BERTELSEN, I. M. G.; BELMONTE, L. J.; FISCHER, G.; OTTOSEN, L. M. Influence of synthetic waste fibres on drying shrinkage cracking and mechanical properties of adobe materials. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 286, p. 122738, jun. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122738>. Acesso em: 10 out. 2025.

BHONG, M.; KHAN, T. K. H.; DEVADE, K.; KRISHNA, B. V.; SURA, S.; EFTIKHAAR, H. P. T.; GUPTA, N. Review of composite materials and applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 81, p. 140-147, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.026>. Acesso em: 2 mar. 2025.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015. DOI: 10.1590/0366-69132015613581860. Acesso em: 9 abr. 2025.

BRITO, M. R.; MARVILA, M. T.; LINHARES JÚNIOR, J. A. T.; AZEVEDO, A. R. G. Evaluation of the properties of adobe blocks with clay and manure. **Buildings**, v. 13, n. 3, p. 657, 2023. DOI: 10.3390/buildings13030657. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings13030657>. Acesso em: 4 jul. 2024.

CALABRIA, J. A.; VASCONCELOS, W. L.; BOCCACCINI, A. R. Microstructure and chemical degradation of adobe and clay bricks. **Ceramics International**, v. 35, n. 2, p. 665–671, 2009. DOI: 10.1016/j.ceramint.2008.01.026. Acesso em: 3 set. 2025.
CALATAN, G.; HEGYI, A.; DICO, C.; SZILAGYI, H. Opportunities Regarding the Use of Adobe-bricks within Contemporary Architecture. **Procedia Manufacturing**, [S.l.], v. 46, p. 150-157, 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.023>. Acesso em: 22 out. 2025.

CALDAS, L. R.; MARTINS, A. P. S.; TOLEDO FILHO, R. D. Construção com terra no Brasil: avaliação ambiental da taipa de pilão. **PARC – Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 12, n. 00, p. e021015, 2021. DOI: 10.20396/parc.v12i00.8656279. Acesso em: 01 nov. 2024.

CAPORALE, A.; PARISI, F.; ASPRONE, D.; LUCIANO, R.; PROTA, A. Comparative micromechanical assessment of adobe and clay brick masonry assemblages based on experimental data sets. **Composite Structures**, [S.l.], v. 120, p. 208-220, fev. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.09.046>. Acesso em: 5 set. 2025.

CASNEDI, L.; CAPPAL, M.; CINCOTTI, A.; DELOGU, F.; PIA, G. Porosity effects on water vapour permeability in earthen materials: experimental evidence and modelling description. **Journal of Building Engineering**, v. 27, art. 100987, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710219309908>. Acesso em: 20 out. 2025.

CASTRILLO, M. C.; IOANNOU, I.; PHILOKYPPOU, M. Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 294, p. 123516, ago. 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123516>. Acesso em: 4 jun. 2024.

CÉSAR, E.; CASTILLO-CAMPOHERMOSO, M. A.; LEDEZMA-PÉREZ, A. S.; VILLARREAL-CÁRDENAS, L. A.; MONTOLYA, L.; BANDALA, V. M.; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, A. M. Guayule bagasse to make mycelium composites: an alternative to enhance the profitability of a sustainable guayule crop. **Biocatalysis And Agricultural Biotechnology**, [S.l.], v. 47, p. 102602, jan. 2023. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102602>. Acesso em: 9 set. 2025.

CHARAI, M.; SALHI, M.; HORMA, O.; MEZRHAB, A.; KARKRI, M.; AMRAQUI, S. Thermal and mechanical characterization of adobes bio-sourced with Pennisetum setaceum fibers and an application for modern buildings. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 326, p. 126809, abr. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126809>. Acesso em: 01 nov. 2024.

CORDEIRO, C. C. M.; MENEGUETTI, K. S.; HARDT, L. P. A. Construções vernáculas em terra: perspectiva histórica, técnica e contemporânea da taipa de mão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 10, p. e01906, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8651212>. Acesso em: 20 nov. 2025.

CONCHA-RIEDEL, J.; ANTICO, F. C.; ARAYA-LETELIER, G. Mechanical and damage similarities of adobe blocks reinforced with natural and industrial fibres. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. 1–11, 2020. DOI: 10.1590/S1517-707620200004.1206. Acesso em: 16 mai. 2026.

CONCHA-RIEDEL, J.; GALLEGOS, G.; SOTO, R. Mechanical strength, mass loss and volumetric changes of adobe matrices combined with kaolin and fine soil particles. **Construction and Building Materials**, v. 311, 126359, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125246>. Acesso em: 8 set. 2025.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides**: structure, properties, reactions, occurrence and uses. 2. ed. rev. e ampl. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. 664 p. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Iron-Oxides%3A-Structure%2C-Properties%2C-Reactions%2C-Cornell-Schwertmann/6901931d17b07713a08cb0f3c4649c2c755e19e7>. Acesso em: 10 abr. 2025.

COSTA, C.; FERNANDES, S.; VELOSA, A.; ROCHA, F. Development of geopolymers formulations based on low-grade kaolins as a potential construction material. Preprints, Basel, 2019. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/201906.0170>. Acesso em: 31 out. 2025.

CRYSTAL IMPACT. **Match! – Phase Analysis using Powder Diffraction**: User Manual. Crystal Impact GbR, Bonn, 2024.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

DA SILVA, N. A.; CECCHIN, D.; ROCHA, C. A. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; PESSIN, J.; ROSSI, G.; BAMBI, G.; CONTI, L.; FERRAZ, P. F. P. Influence of coconut fiber incorporation on the mechanical behavior of adobe blocks. **Agronomy Research**, v. 22, Special Issue 3, p. 1504 - 1516, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.24.064>. Acesso em: 15 mar. 2025

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo, SP: Cengage, 2019. 712 f.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 082**: Solos: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTMENT OF AGRICULTURE (UNITED STATES). NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. Soil survey manual. Washington, DC: USDA-NRCS, 1993.

DIAS, P. P.; JAYASINGHE, L. B.; WALDMANN, D. Investigation of Mycelium-Miscanthus composites as building insulation material. **Results In Materials**, [S.l.], v. 10, p. 100189, jun. 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100189>. Acesso em: 6 nov. 2025.

DORMOHAMADI, M.; RAHIMNIA, R. Combined effect of compaction and clay content on the mechanical properties of adobe brick. **Case Studies In Construction Materials**, [S.l.], v. 13, p. 00402, dez. 2020. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00402>. Acesso em: 5 mai. 2025.

EBERLY COLLEGE OF SCIENCE. **R-Square Cautions**: Coefficient of Determination r^2 and its interpretation. Pennsylvania State University, 2024. Disponível em: <https://online.stat.psu.edu/stat462/node/98/>. Acesso em: 10 ago. de 2025.

ELROI, H.; GRZYMALA, Z.; WÓJCIK-CZERNIAWSKA, A.; SZEWCZYK, P. Enhancing waste resource efficiency: circular economy for sustainability and energy conversion. **Frontiers in Environmental Science**, [S.l.], v. 11, p. 1303792, 2023. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1303792. Acesso em: 7 mai. 2025.

ESLAMI, A.; MOHAMMADI, H.; MIRABI BANADAKI, H. Palm fiber as a natural reinforcement for improving the properties of traditional adobe bricks. **Construction and Building Materials**, v. 325, p. 126808, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126808>. Acesso em: 11 nov. 2025.

ELSACKER, E.; VANDELOOK, S.; VAN WYLUCK, A.; RUYTINX, J.; LAET, L.; PEETERS, E. A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. **Science Of The Total Environment**, [S.l.], v. 725, p. 138431, jul. 2020. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>. Acesso em: 4 set. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 576 p.

FAGES, J.M.; TARQUE, N.; RODRÍGUEZ-MARISCAL, J. D.; SOLÍS, M. Calibration of a total strain crack model for adobe masonry based on compression and diagonal compression tests. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 352, p. 128965, out. 2022. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128965>. Acesso em: 3 out. 2025.

FALCÃO, L. **Reagenciamento de materiais em cinco projetos latino-americano**. 2024. Instagram: @escoladaciade. Fotografia. Disponível em: <https://www.instagram.com/p/DGD4rQYpAYV/>. Acesso em: 27 mar. 2025.

FARIA, G. S. A.; SOUZA, L. R.; PEREIRA, M. C.; OLIVEIRA, T. M. Influência da incorporação de resíduos sobre o comportamento mecânico de tijolos à base de terra no estado saturado: revisão. **ENARC**, v. 9, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.46421/enarc.v9i1.7093>. Acesso em: 11 nov. 2025.

FERNANDES, M. Técnicas de construção em terra. In: **10ª Mesa Redonda de Primavera Terra: Forma de construir Arquitetura – Antropologia – Arqueologia**. Porto, Faculdade de Letras do Porto – FLUP. 2006.

FERNANDEZ, J. A. B. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil**: Relatório de pesquisa. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea. 2012.

FERREIRA, D. F. **Sisvar**: sistema de análise de variância. Versão 5.8. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2016. Disponível em: <http://www.dex.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>. Acesso em: 7 fev. 2026.

FIBRENAMICS. **Materiais compostos**: o que são e quais as suas propriedades. 2025. Fotografia. Disponível em: <https://fibrenamics.com/intelligence/relatorios/materiais-compositos-o-que-sao-e-quais-as-suas-propriedades>. Acesso em: 23 nov. 2025.

FREIRE, W. J. **Tecnologias e materiais alternativos de construção**. Editora da Unicamp. Campinas SP, 2003.

GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A. B.; RODRIGUES, J. E.; MARINO, L.; MATTIELLO, F. **Ensaios de laboratório em geologia**. São Carlos: Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geociências, 1980.

GIARETTON, M.; DIZHUR, D.; MORRIS, H. Material characterisation of heavy-weight and lightweight adobe brick walls and in-plane strengthening techniques. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 310, p. 125309, dez. 2021. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125309>. Acesso em: 3 nov. 2024.

GIROMETTA, C.; PICCO, A. M.; BAIGUERA, R. M.; DONDI, D.; BABBINI, S.; CARTABIA, M.; PELLEGRINI, M.; SAVINO, E. Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: a review. **Sustainability**, [S.l.], v. 11, n. 1, p. 281, 8 jan. 2019. MDPI AG. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su11010281>. Acesso em: 3 ago. 2025.

GOU, L.; LI, S.; YIN, J.; LI, T.; LIU, X. Morphological and physico-mechanical properties of mycelium biocomposites with natural reinforcement particles. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 304, p. 124656, out. 2021. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124656>. Acesso em: 10 ago. 2025.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. **Multivariate data analysis**. 8. ed. Boston: Cengage, 2019.

HANEEF, M.; CESERACCIU, L.; CANALE, C.; BAYER, I. S.; HEREDIA-GUERRERO, J. A.; ATHANASSIOU, A. Advanced Materials From Fungal Mycelium: fabrication and tuning of physical properties. **Scientific Reports**, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 1-11, 24 jan. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/srep41292>. Acesso em: 5 jul. 2025.

HATKAR, A.; LANKE, A. Mycelium: an eco-friendly construction material. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, NCA – 2022, v. 10, n. 03, 11 fev. 2022. Disponível em: <https://www.ijert.org/mycelium-an-eco-friendly-construction-materia>. Acesso em: 9 out. 2025

IGE, O.; DANSO, H. Physico-mechanical and thermal gravimetric analysis of adobe masonry units reinforced with plantain pseudo-stem fibres for sustainable construction. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 273, p. 121686, mar. 2021. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121686>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ISLAM, M. R.; TUDRYN, G.; BUCINELL, R.; SCHADLER, L.; PICU, R. C. Mechanical behavior of mycelium-based particulate composites. **Journal of Materials Science**, v. 53, n. 24, p. 16371–16382, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2797-z>. Acesso em: 11 nov. 2025.

ISLAM, M. R.; TUDRYN, G.; BUCINELL, R.; SCHADLER, L.; PICU, R. C. Morphology and mechanics of fungal mycelium. **Scientific Reports**, v. 7, art. 13070, 12 out. 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-13295-2. Acesso em: 7 ago. 2025.

JO, C.; ZHANG, J.; TAM, J. M.; CHURCH, G. M.; KHALIL, A. S.; SEGRÈ, D.; TANG, T. C. Unlocking the magic in mycelium: using synthetic biology to optimize filamentous fungi for biomanufacturing and sustainability. **Materials Today Bio**, [S.l.], v. 19, p. 100560, abr. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100560>. Acesso em: 5 jun. 2025.

JONES, M. P.; HUYNH, T. T.; DEKIWADIA, C.; DAVER, F.; JOHN, S. Mycelium composites: a review of engineering characteristics and growth kinetics. **Journal of Bionanoscience**, v. 11, n. 4, p. 241–257, 2017. DOI: 10.1166/jbns.2017.1440. Acesso em: 11 mai. 2025.

JONES, Mitchell; HUYNH, Tien; JOHN, Sabu. Inherent species characteristic influence and growth performance assessment for mycelium composite applications. *Advanced Materials Letters*, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 71-80, 1 jan. 2018. **International Association of Advanced Materials**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5185/amlett.2018.1977>. Acesso em: 10 out. 2025.

JONES, M.; MAUTNER, A.; LUENCO, S.; BISMARCK, A.; JOHN, S. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: a critical review. **Materials & Design**, [S.l.], v. 187, p. 108397, fev. 2020. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>. Acesso em: 10 mai. 2025.

KAFODYA, I.; OKONTA, F.; KLOUKINAS, P. Role of fiber inclusion in adobe masonry construction. **Journal Of Building Engineering**, [S.l.], v. 26, p. 100904, nov. 2019. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobte.2019.100904>. Acesso em: 10 mai. 2024.

KALUĐER, J.; KRAUS, I.; PERIĆ, A.; MIHIĆ, I. B. Physical properties of the soil in the walls of traditional eastern Croatia rammed earth houses. **Gradevinar**, v. 75, n. 11, p. 1067–1074, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14256/jce.3608.2022>. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/file/452105>. Acesso em: 18 mar. 2024.

KHAMRAI, M.; BANERJEE, S. L.; KUNDU, P. P. A sustainable production method of mycelium biomass using an isolated fungal strain *Phanerochaete chrysosporium* (accession no: ky593186). **Biocatalysis And Agricultural Biotechnology**, [S.l.], v. 16, p. 548-557, out. 2018. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.09.013>. Acesso em: 11 fev. 2025.

KNIEF, U.; FORSTMEIER, W. Violating the normality assumption may be the lesser of two evils. **Behavior Research Methods**, v. 53, p. 2576–2590, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01587-5>. Acesso em: 5 mai. 2024

KUMANAN, T.s.; SOFI, A. Investigation of the stability of recycled clay adobes by statistical regression analysis – A preliminary study. *Materials Today: Proceedings*, [S.l.], p. 1-6, mar. 2023. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.453>. Acesso em 27 dez. 2025.

KURIBAYASHI, T.; LANKINEN, P.; HIETALA, S.; MIKKONEN, K. S. Dense and continuous networks of aerial hyphae improve flexibility and shape retention of mycelium composite in the wet state. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, [S.l.], v. 152, p. 106688, jan. 2022. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106688>. Acesso em: 10 out. 2025.

KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; NETER, J.; LI, W. **Applied linear statistical models**. 5. ed. Boston: McGraw-Hill Irwin, 2005.

LABAT, M.; MAGDALENA, R.; SAMRI, D.; JAYR, E. Assessment of the natural variability of cob buildings hygric and thermal properties at material scale: Influence of plant add-ons. **Construction and Building Materials**, v. 342, 127922, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127922>. Acesso em: 15 set. 2025.

LAOUIDJI, Z.; BOUTLIKHT, M.; DOUADI, A.; HEBBACHE, K.; ATIKI, E.; BELEBCHOUHE, C.; MORETTI, L.; CZARNECKI, S. Exploring the effect of lime and cement ratios on the mechanical properties of clay bricks made from different types of soils. **Buildings**, v. 15, n. 4, p. 631, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15040631>. Disponível em: 9 out. 2025.

LEE, T.; CHOI, J. Mycelium-composite panels for atmospheric particulate matter adsorption. **Results In Materials**, [S.l.], v. 11, p. 100208, set. 2021. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2021.100208>. Acesso em: 5 ago. 2025.

LIGOWSKI, E.; SANTOS, B. C.; FUJIWARA, S. T. Materiais compósitos a base de fibras da cana-de-açúcar e polímeros reciclados obtidos através da técnica de extrusão. **Polímeros**, v. 25, n. 1, p. 70-75, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1605>. Acesso em 5 mai. 2025.

LINGAM, D.; NARAYAN, S.; MAMUN, K. A.; CHARAN, D. Engineered mycelium-based composite materials: comprehensive study of various properties and applications. **Construction and Building Materials**, v. 391, p. 131841, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131841>. Acesso em: 11 mar. 2025.

LINHARES JUNIOR., J. A.; AZEVEDO, A. R. G.; MARVILA, M. T.; TEIXEIRA, S. R.; FEDIUK, R.; VIEIRA, C. M. . Influence of processing parameters variation on the development of geopolymeric ceramic blocks with calcined kaolinite clay. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00897, 2022. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e00897. Acesso em: 18 mar. 2025.

LONG, V. **Old City of Sana'a (Yemen)**. 2025. Fotografia. OUR PLACE – The World Heritage Collection / UNESCO World Heritage Centre. Disponível em: <https://whc.unesco.org/en/documents/130619>. Acesso em: 23 nov. 2025.

LORENZO, M. P. **Pedologia – morfologia**: consistência do solo. 2010. Disponível em: <https://marianaplorenzo.wordpress.com/2010/10/18/pedologia-morfologia-consistencia-do-solo/>. Acesso em: 20 dez. 2025.

LOSINI, A. E.; GRILLET, A. C.; VO, L.; DOTELLI, G.; WOLOSZYN, M. Biopolymers impact on hygrothermal properties of rammed earth: From material to building scale. **Building and Environment**, v. 233, 110087, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110087>. Acesso em: 11 ago. 2025.

LU, J.; WANG, K.; QU, M. L. Experimental determination on the capillary water absorption coefficient of porous building materials: A comparison between the intermittent and continuous absorption tests. **Journal of Building Engineering**, v. 28, 101091, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101091>. Acesso em: 5 ago. 2025.

MADUSANKA, C.; UDAYANGA, D.; NILMINI, R.; RAJAPAKSHA, S.; HEWAWASAM, C.; MANAMGODA, D.; VASCO-CORREA, J. A review of recent advances in fungal mycelium-based composites. **Discover Materials**, v. 4, n. 1, art. 13, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43939-024-00084-8>. Acesso em: 3 ago. 2025.

MANAN, S.; ULLAH, M. W. UL-ISLAM, M.; ATTA, O. M.; YANG, G. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.01.001>. Acesso em: 5 jul. 2025.

MEIMAROGLOU, N.; MOUZAKIS, C. The role of intrinsic soil properties in the compressive strength and volume change behavior of unstabilized earth mortars. **Materials and Structures**, v. 57, art. 50, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02314-0>. Acesso em: 7 nov. 2025.

MINKE, G. **Manual de construção com terra: uma arquitetura sustentável**. São Paulo: B4 Editores, 225p, 2015.

MOBUSS CONSTRUÇÃO. **Você já ouviu falar da Bioarquitetura?** Construção utilizando técnicas da Bioarquitetura. 2020. Fotografia. Disponível em: <https://www.mobussconstrucao.com.br/blog/bioarquitetura/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO, C. E. M.; MAGALHÃES, A. F.; MELO, M. A. F.; BRITO, J. C. X.; ALMEIDA, T. P. F.; MANSUR, G. L. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 10. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2020.

MOTAMEDI, S.; ROUSSE, D. R.; PROMIS, G. A review of mycelium bio-composites as energy-efficient sustainable building materials. **Energies**, v. 18, n. 16, p. 4225, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18164225>. Acesso em: 27 nov. 2025.

MÜLLER, E. 2020. Fotografia. Instagram: @you.can.find. Disponível em: https://www.instagram.com/p/B_pV2j2IIY0/?igshid=fumbzwqv0qw9. Acesso em: 23 nov. 2025.

NASCIMENTO, J. S.; SILVA, J.; BERNARDES, R. C.; COSTA, G.; EMILIANO, P. Statistical data transformation in agrarian sciences for variance analysis: a systematic review. **F1000Research**, v. 13, p. 459, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11564925/>. Acesso em: 9 mai. 2025.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. Editora Blucher, 2021.

NEVES, C.; FARIA, O. B. (Org.). **Técnicas de construção com terra**. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. 79 p. ISBN 978-85-64472-00-6. Disponível em: <https://redeterrabrasil.net.br/wp-content/uploads/2020/08/T%C3%A9cnicas-de-constru%C3%A7%C3%A3o-com-terra.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2025.

NEVES, C. M. M.; FARIA, O. B.; ROTONDARO, R.; CEVALLOS SALAS, P.; HOFFMANN, M. V. Seleção de solos e métodos de controle na construção com terra: práticas de campo. **Rede Ibero-americana PROTERRA / CYTED – Programa Ibero-americano de Ciência e Tecnologia para o Desenvolvimento**, 2009. Disponível em: <https://www.redeterrabrasil.net.br/wp-content/uploads/2020/08/Sele%C3%A7%C3%A3o-de-solos-e-m%C3%A9todos-de-controle-na-constru%C3%A7%C3%A3o-com-terra.pdf>. Acesso em: 25 set. 2024.

NUCCI, A. **Você sabe o que é micélio?** 2021. Fotografia. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/voc%C3%AA-sabe-o-que-%C3%A9-mic%C3%A9lio-adilson-nucci>. Acesso em: 23 nov. 2025.

O’KELLY, B. C. Review of recent developments and understanding of Atterberg limits determinations. **Geotechnics**, v. 1, n. 1, p. 59–75, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010004>. Acesso em: 17 mar. 2025.

OLACIA, E.; PISELLO, A. L.; CHIODO, V.; MAISANO, S.; FRAZZICA, A.; CABEZA, L. F. Sustainable adobe bricks with seagrass fibres: mechanical and 127roper 127roperities characterization. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117669, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117669>. Acesso em: 8 ago. 2025.

OLIVEIRA, L. K. S.; RÊGO, R. M.; FRUTUOSO, M. N. M. A.; RODRIGUES, S. S. F. B. Simulação computacional da eficiência energética para uma arquitetura sustentável. **HOLOS**, v. 4, p. 217–230, 2016. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/3981>. Acesso em: 9 ago. 2025.

PAULA, K. A.; MIGUEL, E. N.; FREITAS, W. J. S. A cidade patrimonial e turística: uma análise do constructo da imagem e apropriação do centro histórico de Tiradentes – MG a partir das mídias sociais. **Revista de Morfologia Urbana**, Viçosa, v. 8, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.47235/rmu.v8i1.137>. Acesso em: 10 set. 2025.

PEIXOTO, M. V. S.; SOUZA, L. A. C.; REZENDE, M. A. P. O acervo em taipa de pilão em Minas Gerais e novas estratégias de conservação. In: CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL, 6, 2016, Porto. **Anais [...]**. Bauru: São Paulo, 2016.

PELLETIER, M. G.; HOLT, G. A.; WANJURA, J. D.; BAYER, E.; MCINTYRE, G. An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. **Industrial Crops And Products**, [S.l.], v. 51, p. 480-485, nov. 2013. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.09.008>. Acesso em: 3 ago. 2025.

PENG, L.; YI, J.; YANG, X.; XIE, J.; CHEN, C. Development and characterization of mycelium bio-composites by utilization of different agricultural residual byproducts. **Journal Of Bioresources And Bioproducts**, [S.l.], v. 8, n. 1, p. 78-89, fev. 2023. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2022.11.005>. Acesso em: 12 nov. 2025.

PIANI, T. L.; WEERHEIJM, J.; PERONI, M.; KOENE, L.; KRABBENBORG, D.; SOLOMOS, G.; SLUYS, L. J. Dynamic behaviour of adobe bricks in compression: the role of fibres and water content at various loading rates. **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 230, p. 117038, jan. 2020. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117038>. Acesso em: 20 out. 2024.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 16. ed. Piracicaba: FEALQ, 2021.

PUNTO SUSTENTABLE. **Micelio en la arquitectura**. 2023. Fotografia. Disponível em: <https://www.puntosustentable.com/2023/07/14/micelio-en-la-arquitectura/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

RAO, S. M. Novel approach to identify soil compositional factors that control the compressive strength of unstabilized adobes and earth mortars. **Discover Civil Engineering**, v. 1, art. 138, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00144-1>. Acesso em 03 abr. 2025.

REZENDE, M. A. P.; LOPES, W. G. R. Arquitetura e construção vernácula com terra no Brasil. In: NEVES, C. M. M.; MARANHÃO, M. F.; LELIS, N.; FARIA, O. B. (org.). **Arquitetura e construção com terra no Brasil**. Tupã, SP: ANAP – Associação Amigos da Natureza da Alta Paulista, 2022. p. 27-35. ISBN 978-65-86753-59-2.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. Limites de Atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 185-196, 2018. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscar.html?task=detalhes&source=all&id=W2809849725>. Acesso em: 3 set. 2025.

RIBEIRO, T.; OLIVEIRA, D. V.; BRACCI, S. The use of contact sponge method to measure water absorption in earthen heritage treated with water repellents. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 16, n. 1, p. 85–96, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1751344>. Acesso em: 10 out. 2025.

SALIBA, J.; SCHULTZ, A.; MOYE, J.; PISTOL, K. Mechanical characterization and durability of earth blocks. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], p. 1-7, jul. 2023. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.165>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SANTOS, D. P.; BESSA, S. A. L. O uso do adobe no Brasil: uma revisão de literatura. **Mix Sustentável, Florianópolis**, v. 6, n. 1, p. 53–66, 2020. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3741/3054>. Acesso em: 17 mar. 2025.

SANTOS, M. F. N., BATTISTELLE, R. A. G., HORI, C. Y., JULIOTI, P. S. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **Revista GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v.2 p.57-73, 2011. DOI: <https://doi.org/10.15675/gepros.v0i2.882>. Acesso em: 10 set. 2025.

SCHODER, K. A.; KRÜMPPEL, J.; MÜLLER, J.; LEMMER, A. Effects of environmental and nutritional conditions on mycelium growth of three Basidiomycota. **Mycobiology**, v. 52, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/12298093.2024.2341492>. Acesso em: 17 mar. 2025.

SERRA, J. R.; OLIVEIRA, O. J. Um estudo inicial sobre a oportunidade de aproveitamento de resíduos de raspas de couro na produção de pisos. In: XIII SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2006, Bauru, SP. **Anais [...]** Bauru: [s.n.], 2006.

SIENGE. **Construções em taipa de mão**: conheça as possibilidades para a sua obra. 2020. Fotografia. Disponível em: <https://sienge.com.br/blog/construcoes-em-taipa-de-mao/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

SILVA, K. R.; RIBEIRO, A. **Estatística Aplicada à Engenharia Civil**. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

SILVA, L. S. F.; DA SILVA, L. M.; DE OLIVEIRA, I. L. Caracterização da argila caulínica: propriedades químicas e mineralógicas e sua aplicabilidade na construção civil. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 5, p. e14606-e14606, 2025. Disponível em: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/download/14606/8185/39327#:~:text=A%20argila%20caulin%C3%ADtica%2C%20popularmente%20conhecida,tecnol%C3%B3gicos%20na%20sua%20cadeia%20produtiva>. Acesso em: 11 set. 2025

SISTI, L.; GIOIA, C.; TOTARO, G.; VERSTICHEL, S.; CARTABIA, M.; CAMERE, S.; CELLI, A. Valorization of wheat bran agro-industrial byproduct as an upgrading filler for mycelium-based composite materials. **Industrial Crops And Products**, [S.l.], v. 170, p. 113742, out. 2021. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113742>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SIVAPRASAD, S.; BYJU, S. K.; PRAJITH, C.; SHAJU, J.; REJEESH, C. R. Development of a novel mycelium bio-composite material to substitute for polystyrene in packaging applications. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v. 47, p. 5038-5044, 2021. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.622>. Acesso em: 15 set. 2025.

SKEMPTON, A. W. The colloidal “activity” of clays: l’activité colloïdale des argiles. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Zurich, Switzerland, 16–27 Aug. 1953. v. 1, p. 57–61, 1953. Disponível em: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/42/1953_01_0014.pdf. Acesso em: 24 jun. 2025.

SOH, E.; CHEW, Z. Y.; SAEIDI, N.; JAVADIAN, A.; HEBEL, D. E.; LE FERRAND, H. Development of an extrudable paste to build mycelium-bound composites. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121371, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109058>. Acesso em 11 dez. 2025.

SOUZA, A. H. F.; GONÇALVES, N. A. A.; MONTEIRO, V. I.; SANTOS, C. Q.; PAES, I. N. L. Avaliação da absorção capilar de água de diferentes argamassas e sua relação com a microestrutura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 14., 2023. **Anais [...]** 2023. DOI: <https://doi.org/10.46421/sbta.v14.4758>. Acesso em: 5 out. 2025.

SOUZA, C. M. A.; RAFUL, L. Z. L.; VIEIRA, L. B. Determinação do limite de liquidez em dois tipos de solo, utilizando-se diferentes metodologias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n. 3, p. 460–464, 2000. DOI: 10.1590/S1415-43662000000300024. Acesso em: 3 mai. 2025.

SOUZA, E. **Edifícios de cogumelos?** As possibilidades do uso do micélio na arquitetura. 2020. Fotografia. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/948979/edificios-de-cogumelos-as-possibilidades-do-uso-do-micelio-na-arquitetura>. Acesso em: 23 nov. 2025.

SOUZA JUNIOR, A. N.; RUSCH, F.; MOURA, J.; PIMENTA, A. S.; MELO, R. R. A systematic review on stabilizing materials in adobe bricks: properties and influences on mechanical performance. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 30, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/ZdJHLBbHGckf8cXFkrHdvLn/?lang=en>. Acesso em: 22 out. 2025.

ŚRODOŃ, J. Quantitative mineralogy of sedimentary rocks with emphasis on clays and with applications to K-Ar dating. **Mineralogical Magazine**, v. 66, p. 677–687, 2002. DOI: 10.1180/0026461026650055. Acesso em: 17 mar. 2025.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Ensaio de laboratório em mecânica do solo**. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 1981.

SUN, W.; TAJVIDI, M.; HOWELL, C.; HUNT, C. G. Insight into mycelium-lignocellulosic bio-composites: Essential factors and properties. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 161, p. 107125, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107125>. Acesso em: 25 out. 2025.

TANG, B.; XIE, L.; WANG, W.; ZHOU, B.; GONG, Y. Unconfined compressive strength and pore structure evolution law of structural clay after disturbance. **Frontiers in Earth Science**, v. 10, 932621, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.932621>. Acesso em: 01 set. 2025.

TEERAPHANTUVAT, T.; JATUWONG, K.; JINANUKUL, P.; THAMJAREE, W.; LUMYONG, S. Improving the physical and mechanical properties of mycelium-based green composites using paper waste. **Polymers**, Basel, v. 16, n. 2, p. 262, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16020262>. Acesso em: 5 mai. 2025.

TOUATI, K.; LE, G. M.; EL MENDILI, Y.; AZIL, A.; STREIFF, F.; CARFRAE, J.; FOX, M.; GOODHEW, S.; BOUTOUIL, M. Earthen-based building: in-situ drying kinetics and shrinkage. **Construction and Building Materials**, v. 369, art. 130544, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130544>. Acesso em: 22 out. 2024.

TURCO, C.; PAULA JÚNIOR, A.; JACINTO, C.; FERNANDES, J.; TEIXEIRA, E.; MATEUS, R. Influence of particle size on compressed earth blocks properties and strategies for enhanced performance. **Applied Sciences**, v. 14, n. 5, p. 1779, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14051779>. Acesso em: 10 dez. 2025.

UNESCO. Göbekli Tepe. **World Heritage List**, 2018. Disponível em: <https://whc.unesco.org/en/list/1572>. Acesso em: 30 nov. 2025.

UPCYCLING SOLUTIONS. **Upcycling com micélio para execução de painéis, isolamento e piso na construção**: Ecovative Design. 2022. Fotografia. Disponível em: <https://upcyclingsolutions.com.br/2022/12/08/upcycling-com-micelio-construcao/>. Acesso em: 23 nov. 2025.

VALLAS, T.; COURARD, L. Using nature in architecture: building a living house with mycelium and trees. **Frontiers of Architectural Research**, [S.l.], v. 6, n. 3, p. 318-328, set. 2017. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.05.003>. Acesso em: 25 nov. 2025.

VÁŠATKO, H.; GOSCH, L.; JAUKE, J.; STAVRIC, M. Basic research of material properties of mycelium-based composites. **Biomimetics**, v. 7, n. 2, p. 51, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020051>. Acesso em: 10 mai. 2025.

VASIĆ, M. V.; PEZO, L. L.; RADOJEVIĆ, Z. Optimization of adobe clay bricks based on the raw material properties (mathematical analysis). **Construction And Building Materials**, [S.l.], v. 244, p. 118342, maio 2020. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118342>. Acesso em: 23 set. 2025.

VERMA, N.; JUJJAVARAPU, S. E.; MAHAPATRA, C. Green sustainable biocomposites: substitute to plastics with innovative fungal mycelium based biomaterial. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.l.], v. 11, n. 5, p. 110396, out. 2023. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110396>. Acesso em: 4 jul. 2025.

VIMIEIRO, J. I. C.; BESSA, S. A. L.; MATIAS, L. M.; BATISTA, G. E. F.; ANDRADE, D. F. Absorção por capilaridade em adobes produzidos com rejeitos de mineração. **Mix Sustentável**, v. 9, n. 4, p. 195–207, 2023. Disponível em: <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/6346/5358>. Acesso em: 17 mar. 2025.

VOUTETAKI, M. E.; MPALASKAS, A. C. Natural fiber-reinforced mycelium composite for innovative and sustainable construction materials. **Fibers**, v. 12, n. 7, p. 57, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib12070057>. Acesso em: 6 out. 2025.

WALTER, N.; GÜRSOY, B. A study on the sound absorption properties of mycelium-based composites cultivated on waste paper-based substrates. **Biomimetics**, v. 7, n. 3, p. 100, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/biomimetics7030100>. Acesso em: 10 out. 2025.

WANG, X.; ZHANG, Z.; ZHAO, M. Carboxymethylation of polysaccharides from *Tremella fuciformis* for antioxidant and moisture-preserving activities. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.l.], v. 72, p. 526-530, jan. 2015. Elsevier BV. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.08.045>. Acesso em: 10 mai. 2025.

WANG, Y.; WANG, W.; WANG, D.; LIU, Y.; LIU, J. Study on the influence of sample size and test conditions on the capillary water absorption building of porous building materials. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 103120, 2021. DOI: [10.1016/j.jobe.2021.103120](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103120). Acesso em: 10 mai. 2025.

WEBER, W.; YANNAS, S. **Lessons from vernacular architecture**. London: Routledge, 2014. 272 p.

XIA, Q. Utilizing mycelium-based materials for sustainable construction. *In: Proceedings of the 4th international conference on materials chemistry and environmental engineering*, 2024, [S.l.], p. 967. DOI: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/63/20240967>. Acesso em: 15 mar. 2025.

YANG, Z.; ZHANG, F.; STILL, B.; WHITE, M.; AMSTISLAVSKI, P. Physical and mechanical properties of fungal mycelium-based biofoam. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 7, p. 04017030, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001866](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866). Acesso em: 3 abr. 2025.

YARI, M. H.; ESMIZADEH, E.; JAHAN, E.; LOPEZ-CARREON, I.; RIAHINEZHAD, M.; TOUCHETTE, J.; XIAO, Z.; LACASSE, M.; DRAGOMIRESCU, E.. Moisture ingress in building envelope materials: (I) scientometric analysis and experimental fundamentals. **Buildings**, v. 15, n. 5, p. 798, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15050798>. Acesso em: 15 set. 2025.

ZHANG, L.; ZHOU, T.; ZHANG, Z.; TAN, W.; LIANG, Z. Near-surface-mounted retrofitting of adobe walls using different materials: Evaluation of seismic performance. **Structures**, v. 54, p. 1149–1163, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.137>. Acesso em: 11 nov. 2025.

ZHANG, S.; YUE, J.; HUANG, X.; ZHAO, L.; WANG, Z. Study on cracking law of earthen soil under dry shrinkage condition. **Materials**, v. 15, n. 23, p. 8281, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238281>. Acesso em: 4 nov. 2025.

ZHANG, X.; HU, J.; FAN, X.; YU, X. Naturally grown mycelium-composite as sustainable building insulation materials. **Journal Of Cleaner Production**, [S.l.], v. 342, p. 130784, mar. 2022b. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130784>. Acesso em 10 mar. 2025.

ZHANG, Y.; LI, Y.; LUAN, X.; MENG, B.; LIU, J.; LU, Y. Effects of Void Characteristics on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Polyetheretherketone Composites: Micromechanical Modeling and Analysis. **Polymers**, Basel, v. 17, n. 13, p. 1721, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym17131721>. Acesso em: 4 abr. 2025.