



ANA BEATRIZ SILVEIRA ASSIS

**Avaliação das propriedades físicas de adobes tratados com micélio
e substrato pós-cultivo de *Pleurotus ostreatus***

LAVRAS-MG

2023

ANA BEATRIZ SILVEIRA ASSIS

Avaliação das propriedades físicas de adobes tratados com micélio e substrato pós-cultivo de *Pleurotus ostreatus*

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Civil, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof^a. Dr^a. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa

Orientadora

LAVRAS - MG

2023

ANA BEATRIZ SILVEIRA ASSIS

Avaliação das propriedades físicas de adobes tratados com micélio e substrato pós-cultivo de *Pleurotus ostreatus*

Evaluation of the physical properties of adobes treated with mycelium and spent mushroom substrate of *Pleurotus ostreatus*

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de graduação em Engenharia Civil.

APROVADA em 21 de julho de 2023.

Prof^a. Dr^a. Tatiana Cardoso e Bufalo

Dr^a. Cibelli Paula de Castro



Prof^a. Dr^a. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa

Orientadora

LAVRAS – MG

2023

Deus, minha fortaleza...

Aos meus pais Marcos e Rosa, minha irmã Bárbara, minha família, amigos, professores e colegas que me acompanharam em minha jornada de aprendizado.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar forças e nunca me deixar desistir, pelas graças recebidas e por permitir mais essa vitória.

Aos meus pais, Rosa e Marcos por serem exemplo, por todo trabalho que enfrentaram para essa conquista e pelo incentivo.

À minha irmã Bárbara e toda família pelo apoio e confiança.

Ao meu namorado Venicius pelo apoio, confiança, disponibilidade e acreditar em mim.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelas oportunidades de aprendizado e ensinamentos dessa renomada instituição de ensino.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Andréa Aparecida Ribeiro Corrêa, pelo exemplo, amizade, confiança, incentivo e disponibilidade sempre que precisei.

À pós-doutoranda Cibelli Castro por todo ensinamento, apoio e incentivo.

À minha colega de iniciação científica Anna Clara pela ajuda e troca de conhecimento.

Aos membros do Núcleo de Estudos em Biologia de Fungos - BIOFUNGI por todos os ensinamentos e ajuda no experimento. Em especial à técnica Elisângela, por toda disponibilidade e ao Prof. Dr. Eustáquio, sempre solícito para auxiliar com sugestões teóricas e práticas.

À equipe do Projeto Adobe & Fungos por toda ajuda e aprendizado.

Ao Núcleo de Estudos em Materiais e Técnicas não Convencionais na Construção Civil – NEMATEC, por todos os ensinamentos adquiridos, por todas as oportunidades de crescimento pessoal e profissional.

À empresa Cogumelos Umami pelo fornecimento dos SMS.

Às minhas companheiras da Republica Joia Rara pela amizade verdadeira, apoio e por tantos momentos divertidos que passamos juntos nesses anos de vida universitária.

A todos meus amigos, presentes ou distantes, pela amizade, confiança e torcida. Em especial, à Letícia Cordeiro que compartilhou comigo a vida acadêmica e bons momentos durante a graduação.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma, para a minha formação e essa conquista.

Obrigada a todos!

RESUMO

O adobe, consagrado material vernacular em construção sustentável, é produzido a partir de água e solo. Sua composição e verificação de viabilidade para uso na construção devem ser avaliadas quanto à granulometria e mineralogia para definir se há correção com areia e/ou estabilização com outros materiais, ou se é inviável. Um projeto inovador em biocompósitos no campo da construção civil consiste na aplicação de micélio de fungos que pode atuar como reforço. Compósitos à base de micélio fúngico, têm sido amplamente aplicados em tijolos e blocos, no entanto sua utilização em adobes é considerada uma inovação, representando um avanço promissor na tecnologia de construção sustentável. Os micélios de fungos podem ser também residuais, obtido do substrato exaurido de cogumelos (SMS, sigla em inglês de *spent mushroom substrate*), fresco (pós-colheita) ou seco (pós-colheita armazenado por longo período). Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar as propriedades físicas de adobes tratados com micélio fúngico e substrato pós-cultivo de *Pleurotus ostreatus*. O solo utilizado teve correção granulométrica na proporção de 2 para 1 de areia média em massa seca. Todos os tratamentos tiveram a porcentagem em relação à massa seca do solo corrigido. Os tratamentos foram: solo corrigido para controle (T1); solo corrigido com adição de 2% de cal hidratada e inoculação de 0,5% de semente do fungo *Pleurotus ostreatus* (T2); solo corrigido com adição de 12,5% de SMS fresco e 12,5% de partículas de bambu (T3); solo corrigido com adição de 25% de SMS fresco (T4). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com 5 repetições. As propriedades físicas avaliadas foram: densidade aparente, retração linear, absorção de água e capilaridade. Os resultados demonstram que a utilização de *Pleurotus ostreatus*, tanto em semente quanto em SMS, reduziu a densidade aparente, em até 0,25 g cm⁻³, e a retração linear dos adobes, em até 3,5 mm. Para as características de absorção de água e capilaridade a adição dos estabilizantes reduziram a sua qualidade em relação ao adobe convencional. A adição de SMS fresco resultou em um aumento de 0,62 g cm⁻² na absorção de água e 4,4 mm na altura capilar, ambos em 60 minutos de medição, quando comparado ao tratamento controle. A utilização de micélio fúngico de *Pleurotus ostreatus* e SMS em compósitos de adobe (biocompósitos), revelam um caminho promissor para aprimorar as características desse material de construção. No entanto, requer mais estudos para investigar as melhores proporções destes materiais na composição de adobes. Essa abordagem inovadora pode contribuir para o avanço da construção sustentável, promovendo soluções mais eficientes e ambientalmente conscientes.

Palavras-chave: Adobe biológico. Biomateriais. Materiais não convencionais. Micélio fúngico. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Adobe, an established vernacular material in sustainable construction, is produced from water and soil. Its composition and verification of viability for use in construction must be evaluated in terms of granulometry and mineralogy to define whether there is correction with sand and/or stabilization with other materials, or if it is not feasible. An innovative project in biocomposites in the field of civil construction consists of the application of fungal mycelium that can act as reinforcement. Composites based on fungal mycelium have been widely applied in bricks and blocks, however their use in adobes is considered an innovation, representing a promising advance in sustainable construction technology. Fungal mycelia can also be residual, obtained from spent mushroom substrate (SMS), fresh (post-harvest) or dried (post-harvest stored for a long period). In this context, the objective of this work was to evaluate the physical properties of adobes treated with fungal mycelium and post-cultivation substrate of *Pleurotus ostreatus*. The soil used had granulometric correction in the ratio of 2 to 1 of average sand in dry mass. All treatments had the percentage in relation to the dry mass of the soil corrected. The treatments were: corrected soil for control (T1); corrected soil with the addition of 2% hydrated lime and inoculation of 0.5% seed of the fungus *Pleurotus ostreatus* (T2); corrected soil with the addition of 12.5% fresh SMS and 12.5% bamboo particles (T3); corrected soil with the addition of 25% fresh SMS (T4). The experimental design was completely randomized with 5 replications. The physical properties evaluated were: apparent density, linear shrinkage, water absorption and capillarity. The results demonstrate that the use of *Pleurotus ostreatus*, both in seed and in SMS, reduced the apparent density, by up to 0.25 g cm^{-3} , and the linear retraction of the adobes, by up to 3.5 mm. For the characteristics of water absorption and capillarity, the addition of stabilizers reduced its quality in relation to conventional adobe. The addition of fresh SMS resulted in an increase of 0.62 g cm^{-2} in water absorption and 4.4 mm in capillary height, both within 60 minutes of measurement, when compared to the control treatment. The use of fungal mycelium from *Pleurotus ostreatus* and SMS in adobe composites (biocomposites) reveals a promising way to improve the characteristics of this building material. However, further studies are needed to investigate the best proportions of these materials in the adobe composition. This innovative approach can contribute to the advancement of sustainable construction by promoting more efficient and environmentally conscious solutions.

Keywords: Biologinal adobe. Biomaterials. Fungal mycelium. Sustainability. Unconventional materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Spent mushroom substrate</i> (SMS) gerado a partir do <i>Pleurotus ostreatus</i>	24
Figura 2 - Utilização do <i>Spent mushroom substrate</i> (SMS) na economia circular.....	25
Figura 3 - A primeira torre construída com tijolos de micélio de fungos (Hy-Fi Tower)	30
Figura 4 - Confeção dos adobes. A - Homogeneização dos materiais secos. B - Adição da primeira água. C - Mistura após 24h de descanso. D - Adição de estabilizantes (no caso SMS). E - Adição do restante da água. F e G – Nova homogeneização da mistura com enxada e pés. H - Mistura resultante. I - Adição da mistura nas formas. J - Desmolde. K - Adobes antes da secagem.....	33
Figura 5 - Forma metálica utilizada na confecção.....	34
Figura 6 - Teste “Queda da bola”	36
Figura 7 - Medição das dimensões do adobe.....	36
Figura 8 - Medição da retração linear.....	37
Figura 9 - Ensaio de capilaridade e absorção de água. A) Submersão das esponjas em água. B) Adição do adobe sobre a esponja saturada. C) Medição da altura de absorção de água.....	38
Figura 10 - Resultados do ensaio de retração linear.....	40
Figura 11 - Resultados médios de absorção de água (g cm^{-2}) dos adobes.....	41
Figura 12 - Resultados médios de capilaridade (mm) dos adobes.. ..	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação granulométrica do solo utilizado na mistura	32
Tabela 2 – Características físicas dos materiais utilizados na produção dos adobes	32
Tabela 3 – Quantificação dos materiais utilizados na produção dos adobes	34
Tabela 4 – Caracterização da densidade aparente (g cm^{-3}) e retração (mm) dos adobes	39
Tabela 5 – Absorção de água (%), pelo método da NBR 8492 de tijolo solo-cimento, após imersão de 60 minutos dos adobes	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Construção com terra.....	13
2.1.1	Contexto histórico.....	13
2.1.2	Principais técnicas	14
2.2	O adobe.....	16
2.3	Composição do adobe.....	18
2.4	Propriedades físicas do adobe	20
2.5	Macrofungos.....	21
2.5.1	<i>Pleurotus ostreatus</i>	22
2.6	Composto pós-cultivo de cogumelo (SMS).....	23
2.7	Economia circular do SMS	25
2.7.1	SMS utilizado como substrato de cogumelo.....	26
2.7.2	SMS utilizado para produção de energia	26
2.7.3	SMS utilizado como biofertilizante	27
2.7.4	SMS utilizado para alimentação animal.....	27
2.7.5	SMS utilizado para constituição de materiais.....	28
2.8	Fungos e suas perspectivas na construção civil.....	28
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1	Local do experimento	31
3.2	Delineamento experimental	32
3.3	Produção dos adobes	32
3.4	Propriedades físicas.....	36
3.4.1	Densidade aparente e dimensões após secagem	36
3.4.2	Retração linear.....	37
3.4.3	Absorção de água e capilaridade.....	37
3.5	Análise estatística.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1	Densidade aparente e retração linear	38

4.2	Absorção de água e capilaridade.....	41
5	CONCLUSÃO.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

O conceito de desenvolvimento sustentável de materiais enfatiza uma área de inovação que se concentra não apenas na preservação dos recursos, mas também no desenvolvimento de processos industriais ecologicamente corretos. Nesse âmbito, dado o interesse atual em técnicas de bioconstrução com materiais não convencionais, o adobe surge como uma importante alternativa ecologicamente correta e com baixo impacto ao meio ambiente (JUNIOR *et al.*, 2019).

Os adobes são blocos de terra crua moldados em fôrmas de madeira ou metálicas, em um processo artesanal ou semi-industrial sendo a secagem realizada ao ar livre. Os blocos são produzidos a partir de água e solo, que de acordo com o resultado da sua caracterização pode haver necessidade de correção granulométrica e/ou estabilização (CORREA *et al.*, 2015).

O adobe possui várias vantagens significativas como apelo ecológico, baixa emissão de carbono, durabilidade, segurança, disponibilidade abundante de matéria-prima e custo reduzido de produção e aplicação, além de excelente desempenho térmico. No entanto, existem desafios associados à absorção de água, podendo levar à desintegração quando exposto diretamente às intempéries, bem como à resistência mecânica à compressão. Além disso, uma composição inadequada de argilo-mineral ou mesmo a sua composição granulométrica, podem resultar em produtos frágeis, com a presença de fissuras e rachaduras em sua estrutura (CORREA *et al.*, 2015). Diante disso, estão sendo exploradas diferentes formulações para o adobe, visando aprimorar seu desempenho (CORREA *et al.*, 2015; GANDIA, 2019; RENZO, 2023).

A tecnologia de materiais compósitos na construção civil oferece uma combinação de leveza, rigidez e resistência a preços de produção relativamente mais baixos. Esses materiais são resultantes da combinação de pelo menos dois materiais distintos, criando um material heterogêneo e multifásico com um desempenho aprimorado em comparação com cada material individualmente considerado (LIMA, 1997). A contraparte sustentável desta tecnologia, os materiais biocompósitos, consiste na conjugação de materiais de origem natural promissores em fornecer materiais de construção ambientalmente amigáveis (CALLISTER; WILLIAM, 2022).

Compósitos à base de adobe para aprimoramento de suas propriedades termomecânicas e resistência à umidade têm sido foco de recentes trabalhos na literatura. Salih; Osofero; Imbabi (2020) revisaram o desenvolvimento de reforços com fibras no adobe, evidenciando a premissa

de que biocompósitos de adobe e fibras derivadas de materiais residuais para aplicação como materiais de construção sustentáveis têm propriedades físicas e mecânicas melhoradas em relação à formulação de adobe padrão. No que tange a sensibilidade do adobe à água, Gandia (2019) incorpora “baba de cupim sintética”, estabilizador com alto poder coesivo e hidrofóbico, apresentando significativa resistência do adobe à água, além de melhora em suas propriedades físicas.

Uma das mais recentes inovações em biocompósitos para a indústria da construção civil é a aplicação de micélio de fungos. Os micomateriais, ou compósitos à base de micélio de fungos, têm sido amplamente aplicados em tijolos e blocos, destacando-se pela valorização de resíduos lignocelulósicos, baixa densidade e boas propriedades isolantes, tanto em relação aos aspectos acústicos quanto térmicos, além de apresentarem resistência à umidade. Os fungos são organismos capazes de fornecer coesão por meio da formação de uma rede de filamentos microscópicos chamados hifas, que constituem o micélio (GIROMETTA *et al.*, 2019; BITTING *et al.*, 2022; LI *et al.*, 2022; BALAE; RADU; TÂNASE 2023).

Dentre os fungos utilizados nesses biocompósitos, o *Pleurotus ostreatus* surge como uma importante opção. Essa espécie é amplamente cultivada comercialmente, bem como em escala doméstica, devido à sua capacidade de crescer em substratos ricos em celulose, como serragem, palha ou resíduos agrícolas. O cultivo é relativamente simples, tornando-o uma opção popular para produtores de cogumelos. Devido às altas taxas de crescimento micelial e suas habilidades enzimáticas, o *Pleurotus ostreatus* é facilmente cultivado em diversos substratos, o que possibilita a decomposição eficiente de materiais lignocelulósicos (KNOP *et al.*, 2015; BELLETTINI *et al.*, 2016).

No campo da construção civil sustentável, os blocos de micélio apresentam um desempenho térmico excelente, são biodegradáveis e possuem resistência à umidade, uma vez que as hifas desenvolvidas em torno das matérias-primas são hidrofóbicas. Esses blocos têm potencial de aplicação como elemento estrutural de suporte de carga na arquitetura, embora ainda limitado a protótipos de pequena escala e instalações arquitetônicas devido principalmente à falta de padronização nos métodos de produção (ZHANG *et al.*, 2022).

A transformação de resíduos agrícolas em matérias-primas para processos com geração de produtos valiosos é a premissa das abordagens em economia circular e bioeconomia. Nesta perspectiva, a produção de cogumelos comestíveis, cujo mercado global está projetado para alcançar 82,4 bilhões de dólares em 2028, destaca-se como um produto de alto valor agregado

e alto teor nutricional. Um subproduto gerado nesse processo é o substrato exaurido de cogumelos (SMS, na sigla em inglês para spent mushroom substrate), que pode estar fresco (após a colheita) ou seco (armazenado por longos períodos) (PHAN; SABARATNAM, 2012). Considerando a atual preocupação do descarte desse resíduo e a alta concentração de matéria orgânica do SMS, estudos e discussões sobre as potencialidades do uso de SMS para a produção de produtos de valor agregado vêm sendo cada vez mais frequentes (JASIUNAS *et al.*, 2017; HANAFI *et al.*, 2018).

O SMS consiste principalmente de micélio fúngico residual – uma rede de hifas entrelaçadas que emerge da colonização de resíduos agroindustriais por fungos –, biomassa lignocelulósica desintegrada, nutrientes e enzimas. Esse tem sido empregado como substrato para um novo ciclo de cultivo de cogumelos, biofertilizante e correção do solo, ração animal, e nas inovadoras áreas da produção de energia renovável, biorremediação e proteção contra a radiação ultravioleta (PAREDES *et al.*, 2009; LOU *et al.*, 2017; LEONG *et al.*, 2022; QIN *et al.*, 2022; RAO *et al.*, 2022). Sendo a formação de compósito de adobe com este material, sendo isto ainda não estudado, como uma alternativa de reutilização do SMS.

Nesse âmbito, o objetivo desse trabalho foi avaliar as propriedades físicas de adobes tratados com micélio fúngico e substrato pós-cultivo de *Pleurotus ostreatus*. Para isso, foram confeccionados diferentes compósitos de adobe, produzidos com o fungo, SMS e partículas de bambu.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Construção com terra

2.1.1 Contexto histórico

O emprego do solo como material de construção faz parte do patrimônio histórico do homem, a construção com solo fez parte dos primeiros abrigos construídos pelo homem a partir da mistura ou não com outros materiais, como madeiras e pedras (LIBRELOTTO *et al.*, 2022). As moradias precursoras das cavernas foram as tendas e as cabanas, conforme fosse o estilo de vida ou meio de subsistência dos povos. Desta última, majoritariamente, se originaram as

tecnologias de construção modernas e foram nestas que a construção com solo teve seu maior uso (PALAZZO, 2021).

As construções com solo presentes na Palestina, China, Peru, México e em vários países da África, cuja existência remete a cerca de 8.000 anos a.C. são exemplos de quão antiga é utilização deste material na construção civil (OLENDER, 2006; CARVALHO; LOPES, 2012). As técnicas de utilização do solo foram difundidas pelos povos às regiões conquistadas, e na sequência por esses povos conquistados a outras regiões e, assim, sucessivamente, por todo o mundo através dos séculos, o que explica a sua presença em praticamente todo o planeta. O uso do solo na construção foi difundido pelo mundo de maneiras distintas, de modo a constituir um vasto acervo histórico-cultural (OLENDER, 2006).

A utilização do solo como material de construção deve-se fundamentalmente à sua presença em grandes quantidades no mundo e à sua excelente trabalhabilidade quando misturado com água (GOMES, 2005). Atualmente, a busca pela sustentabilidade tem apostado nesse material para uso em construções mais ecológicas e amigáveis com o meio ambiente e a saúde do ser humano, pois o solo é um material versátil que pode ser adaptado a diferentes climas, regiões e principalmente diferentes técnicas, relacionada a períodos e culturas distintas.

2.1.2 Principais técnicas

O solo é um material de construção altamente versátil, com diversas aplicações. Pode ser utilizado de diferentes formas, como adobes, blocos comprimidos, painéis monolíticos compactados pré-fabricados ou moldados no local (taipas de pilão, taipas de mão ou de sebe), elementos em cob, terra ensacada, sistemas mistos e em blocos (LIBRELOTTO *et al.*, 2022). Para garantir a estabilização, podem ser adicionados cal, cimento, betume ou até mesmo elementos orgânicos, como fibras com o objetivo de reduzir a retração do solo.

A técnica de taipa de pilão é um método monolítico, em que as paredes de solo são construídas de uma só vez, preenchendo e compactando com solo úmida o espaço formado entre pranchas, geralmente feitas de madeira (RENZO, 2023).

De acordo com Montoro (1994), a qualidade da taipa está diretamente relacionada à seleção e dosagem do solo, assim como a sua compactação. Para escolher o solo adequado, é necessário coletar amostras na região ou no local específico onde a construção será realizada. Essa coleta deve ser feita a uma profundidade de aproximadamente 30 cm, uma vez que a

camada superior, acima dessa medida, é fértil e não recomendada para uso na construção. Ressalta-se que o solo utilizado na construção não deve conter matéria orgânica, pois isso compromete a resistência do material. Essa técnica construtiva pode variar de acordo com o uso de fôrmas, camadas de solo e reforços, como pedregulhos. A essência da técnica consiste na sobreposição de camadas e sua compactação (apiloamento), que pode ser realizada manualmente com o uso de soquetes ou pilões, ou de maneira mecanizada com equipamentos elétricos ou pneumáticos. Normalmente, são utilizadas camadas de diferentes cores de solo, o que confere um aspecto visual único às construções (VYNCKE; KUPERS; DENIES, 2018).

A técnica da taipa de mão foi introduzida no Brasil pelos colonizadores europeus e se fundiu com a técnica construtiva dos índios, que utilizavam palha na construção de suas ocas. Essa técnica foi adaptada de acordo com o clima de cada região, sendo menos utilizada em regiões quentes e úmidas, Norte, e mais adequada ao clima quente e seco, Nordeste (LEMOS, 1979).

Canteiro e Pisani (2006) destacam que a taipa de mão também é conhecida como taipa de sebe, pau a pique, taipa de pescoção, sopapo, entre outros termos. Para construir as paredes de taipa de mão, é criada uma trama de madeira formada por peças verticais chamadas de "paus a pique" e peças horizontais, feitas de madeira ou bambu, conhecidas como varas. Essas peças são fixadas umas às outras utilizando diversos materiais, como cipós, fibra de sisal, arame, pregos, entre outros. Após a conclusão da estrutura da trama, são adicionadas porções de barro, previamente preparado, para preencher os vazios e formar a parede.

O cob é uma mistura de solo em estado plástico, composta por argila, água, areia e palha. No Brasil, é comum também o uso de uma espécie de "grude", uma cola à base de farinha, na mistura. O solo, no formato de bolas, é sobreposto para criar volumes que são utilizados para a vedação vertical ou horizontal, sem desempenhar uma função estrutural (LIBRELOTTO *et al.*, 2022). A técnica de construção conhecida como terra ensacada é uma forma de arquitetura com sacos de solo desenvolvida pelo arquiteto e fundador da CalEarth, Nader Khalili. Segundo Khalili (1999), o sistema consiste em utilizar sacos de areia longos ou curtos que são preenchidos com solo úmido e dispostos em camadas ou bobinas longas. Fios de arame farpado são colocados entre cada camada de saco de areia para funcionar como uma espécie de argamassa e reforço. Além disso, podem ser adicionados estabilizadores como cal, cimento ou emulsão asfáltica.

Esse sistema de construção pode ser empregado na criação de arcos estruturais, cúpulas, abóbadas e formas retas convencionais. Além disso, o mesmo método pode ser utilizado na construção de silos, elementos de paisagismo e infraestruturas como barragens, cisternas, estradas, pontes, bem como para a estabilização de linhas costeiras e cursos d'água (Cal-Earth - The California Institute of Earth Art and Architecture).

As técnicas mistas são sistemas construtivos que podem ser utilizados em todas as regiões, fazendo uso principalmente de recursos naturais e, atualmente, também de recursos industriais. Essas técnicas são caracterizadas pela sua grande diversidade e ainda há muito a ser explorado nessa área, especialmente no que diz respeito ao uso de materiais regionais e à prática construtiva baseada na cultura local (GARZÓN, 2011). De acordo com Vyncke; Kupers; Denies (2018), os blocos de solo podem ser classificados em três tipos: blocos cortados, blocos comprimidos e adobes (secados ao sol), conhecidos em inglês como compressed earth blocks (CEB) ou BTCs (Blocos de Terra Comprimida). Sendo a utilização de adobe uma das técnicas mais antigas do mundo.

2.2 O adobe

O adobe é uma das técnicas de construção com solo mais tradicionais. Construções feitas com adobe podem ser encontradas em todos os continentes, em diferentes climas (quentes, frios, subtropicais, temperados) e em todas as latitudes. Quase todas as culturas e civilizações pré-industriais utilizaram o adobe na construção de edifícios (DETHIER, 1985).

No Brasil, os sistemas construtivos com solo foram introduzidos e amplamente utilizados durante o período colonial, passando por diferentes cenários e tendências. No entanto, com a Revolução Industrial, o uso desses sistemas declinou devido à introdução de novos materiais que aparentemente ofereciam mais vantagens. Todavia, devido aos crescentes problemas ambientais causados pelo uso indiscriminado de materiais industriais, o adobe está ressurgindo como uma opção com potencial de aplicação, principalmente devido ao seu baixo impacto ambiental (SANTOS *et al.*, 2020).

Conforme Dethier (1982), a palavra "adobe" tem origem árabe e significa tijolos feitos de terra crua. O adobe é considerado um material reciclável, pois é feito a partir do solo e água, sem necessidade de queima, e ao final de seu ciclo de vida, pode voltar ao seu estado original. O processo de construção com adobe requer uma análise prévia do solo em relação à sua textura

e origem mineralógica. É possível incorporar materiais como areia, fibras naturais e sintéticas, resíduos e outros estabilizantes para melhorar suas propriedades físicas e mecânicas. A confecção do adobe envolve a mistura de solo areno-argiloso e água até obter uma massa de barro homogênea e plástica. A mistura é colocada em formas e, após a remoção das formas, a secagem é realizada em um local protegido por um período variável, dependendo da região. A secagem é considerada completa quando a massa atinge uma umidade constante (GANDIA,2017).

Durante o processamento do adobe, é importante garantir a quantidade ideal de água, “ponto”, para evitar fissuras e deformações durante a remoção das formas e a secagem (CORRÊA, 2013). Existem métodos empíricos simples, como o teste da "Queda da Bola" e o "Prueba de Vicat", que facilitam a determinação desse “ponto” (RUIZ; LUNA, 1983; BARBOSA; GHAVAMI, 2007). O adobe pode ser utilizado na construção de paredes de alvenaria vertical, seguindo um processo construtivo semelhante ao utilizado com materiais convencionais, como tijolos cerâmicos. Os adobes são assentados com uma argamassa de solo e cal, permitindo uma melhor conexão dos materiais e evitando fissuras, garantindo a qualidade da alvenaria (TORRALBA; EIRE; JALALI, 2009).

O uso do adobe em construções apresenta diversas vantagens que justificam sua promoção e incentivo. Primeiramente, a matéria-prima necessária para produzir o adobe é facilmente encontrada no local de construção, eliminando a necessidade de deslocamento, consequentemente reduzindo os custos. Além disso, ele é ambientalmente sustentável, uma vez que sua obtenção e manipulação não causam contaminação do meio ambiente. Ao contrário dos tijolos cerâmicos, que exigem um processo de queima em fornalhas a altas temperaturas por longos períodos, o adobe requer um baixo consumo de energia (RENZO, 2023).

O adobe também favorece a autoconstrução e a autossuficiência, pois a comunidade local pode facilmente encontrar, extrair e manipular o solo necessário, atendendo à demanda por construções de baixo custo em regiões com infraestrutura técnica limitada e mão de obra não especializada. Além disso, o adobe é altamente reciclável e não gera resíduos, podendo ser reutilizado de várias maneiras (RENZO, 2023).

De acordo com Renzo (2023) outra vantagem do adobe é o seu bom desempenho térmico e acústico. Ele é capaz de equilibrar as temperaturas internas em regiões com grandes variações térmicas, controlando o calor e o resfriamento. Além de ser adaptável a diferentes

regiões climáticas e oferece uma ampla variedade de formas e estilos arquitetônicos, como evidenciado por diversos registros históricos e culturais.

No entanto, apesar das inúmeras vantagens, o adobe tem sido associado à pobreza e à insalubridade no Brasil e em algumas regiões do mundo. Isso se deve em grande parte à perda de conhecimento sobre as técnicas adequadas de construção com terra crua, especialmente após a revolução industrial e o período pós-guerra. Essa falta de conhecimento resultou em um aumento significativo do preconceito em relação ao uso do adobe (RENZO, 2023).

Além do preconceito e da falta de informação, existem outros desafios a serem enfrentados. Um deles é a alta absorção de umidade pelo adobe, o que compromete sua resistência mecânica, desempenho térmico e vida útil. Outro desafio é a falta de padronização devido à variedade de tipos de solos e o alto índice de trincas (MINKE, 2001). As trincas e fissuras podem ocorrer devido à mineralogia da argila, ao processo de secagem e à composição da mistura utilizada na construção.

No entanto, muitos pesquisadores (CORREA 2013, GANDIA 2017, MUÑOZ *et al.* 2020, RENZO, 2023) têm contribuído para superar esses desafios por meio de estudos e pesquisas, fornecendo recomendações para novas pesquisas, levando em consideração as potencialidades do material, seu apelo ecológico e sua relevância histórico-cultural. Esses esforços visam promover o uso adequado do adobe e explorar todo o seu potencial como uma opção sustentável e eficiente na construção civil.

2.3 Composição do adobe

O solo é a matriz do adobe, tendo como composição argila, silte e areia. Este apresenta grande variação em sua composição, ou seja, alto grau de complexidade relacionada a sua composição química e mineralógica. Dentre os principais elementos químicos, tem-se a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3), a hematita (Fe_2O_3) e outros óxidos com composição variável e predominância de sílica. Nos trópicos há a predominância de solos latossolos, de cor avermelhada, que têm alto teor de óxido de ferro. Com características físicas e mecânicas peculiares, é um meio descontínuo formado por grãos sólidos e vazios, cuja composição inclui material inerte e expansivo (CORRÊA, 2013).

A argila desempenha um papel fundamental como aglutinante no adobe tradicional, ela possui uma estrutura cristalina que varia de fraca a forte e é classificada de acordo com sua

origem mineralógica em três tipos. As caulinitas, elas apresentam ligações mais fortes, são hidrofóbicas e têm baixa expansão. As illitas, possuem uma força de ligação inferior a caulinita, não são estáveis em contato com a água e têm uma expansão moderada. Já as montmorilonitas, possuem uma fraca força de ligação, são altamente expansivas e, portanto, apresentam muitas fissuras e trincas, sendo desaconselháveis para a fabricação de adobe (GALÁN-MARIN; RIVERA-GÓMEZ; PETRIC, 2010).

A qualidade na produção e aplicação de estruturas em adobe, assim como sua regulamentação, são garantidas por meio do conhecimento e aplicação de normas técnicas. No Brasil, além das normas de outros países, como a peruana (NTE 080 - Norma Técnica de Edificación, 2000) e australiana, também é utilizada a norma nacional, a ABNT NBR 16814:2020 - Adobe - Requisitos e métodos de ensaio. A criação e publicação da norma brasileira pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em 20 de janeiro de 2020, fortalece a visibilidade e a aplicação do adobe como um material não convencional no mercado nacional da construção civil (RENZO, 2023). Entretanto, é possível acrescentar outros materiais na produção do adobe visando melhorar sua estabilidade.

A estabilização do adobe é um processo no qual os materiais adicionados à matriz de solo melhoram a qualidade final do adobe. Para alcançar esse objetivo, uma variedade de fibras naturais e sintéticas podem ser adicionadas em proporções distintas, bem como resíduos de indústrias, resíduos agrícolas, cal, gesso e outros aditivos (GANDIA, 2017).

De acordo com Savastano (1986), a utilização de fibras naturais, para reforçar compósitos, já é bem difundida no Brasil. A adição de fibras naturais ao solo em seu estado plástico traz diversos benefícios, como o incremento de maleabilidade ao material, aumentando sua coesão e durabilidade. Além disso, melhoram a resistência à flexão, reduzem a propagação de fissuras durante o processo de secagem, conferem ductilidade ao material e aumentam sua capacidade de absorver energia (CORRÊA, 2013).

Com o objetivo de aprimorar as propriedades físicas e mecânicas do adobe, diversos estudos têm sido publicados, explorando a adição de resíduos naturais, tais como fibra de coco (COSTA, 2014), vinhaça (ROCHA, 2021), bagaço de cana (MOTA, 2020), partículas de bambu (CORRÊA *et al.* 2015), curauá (BOUTH, 2005), palha de arroz (BRILHANTE, 2021).

Bouth (2005) conduziu estudos utilizando fibras de curauá, uma fibra natural com propriedades similares às fibras de vidro, e obteve resultados positivos em termos de resistência mecânica do adobe, cumprindo os padrões estabelecidos pela ABNT para solo cimento. A

adição de fibras permite alcançar estabilidade dimensional e controle de fissuras de encolhimento, conforme apontado por GalánMarin (2010).

Ao utilizar partículas de bambu como estabilizante para o adobe, observou-se uma redução na densidade do material. Além disso, a adição de "baba de cupim sintética" (BCS) juntamente com as partículas de bambu resultou em uma diminuição na retração do adobe e uma menor absorção de água, devido às propriedades hidrofóbicas do produto adicionado. Em relação à resistência à compressão, foi constatado que a incorporação de 6% em massa de partículas de bambu, juntamente com a adição de BCS, resultou em um adobe com resistência à compressão 90% maior comparado ao convencional (CORRÊA *et al.*, 2015).

A incorporação desses resíduos ao adobe, em diferentes tamanhos de partículas, percentagens e origens, possibilita a formação de compósitos com características físico-mecânicas superiores. Essa abordagem contribui para melhorar o isolamento térmico, aumentar a resistência à compressão e reduzir a densidade do material. Além disso, oferece uma destinação adequada para esses resíduos (GANDIA, 2017).

2.4 Propriedades físicas do adobe

As propriedades físicas são propriedades específicas de determinada matéria. Dentre elas para o adobe são avaliadas principalmente a densidade aparente, retração e capilaridade (ARAYA-LETELIER *et al.*, 2021). A utilização de fibras naturais na estruturação e armação do adobe tende a reduzir sua densidade aparente. Por outro lado, na estabilização química, ocorre o oposto devido à maior coesão das partículas argilo-minerais (CORRÊA, 2013).

Segundo BNH (1985), a retração não deve exceder 20 mm para tijolos e blocos de solo-cimento. Por sua vez, Yetgin *et al.* (2008) afirma que a presença de maior quantidade de fibras naturais no adobe resulta em menor retração.

A norma NBR 8492 (ABNT, 1994) recomenda que a umidade não ultrapasse 18% para tijolos de solo-cimento. Estudos sobre absorção de água em adobes foram conduzidos por Faria (2002) e Varum *et al.* (2007), entre outros. Faria (2002) investigou a utilização de diferentes quantidades de macrófitas aquáticas, obtendo variação na umidade de 24,88% a 31,76%. Além disso, Varum *et al.* (2007) observou um aumento de peso de 17% e 26% após seis horas de imersão em dois tipos de adobes utilizados em construções em Angola.

Em um estudo realizado por Millogo *et al.* (2016), ao utilizar fibras de esterco de vaca, foi observada uma melhora nas propriedades físicas e mecânicas do adobe. Essa melhora foi atribuída à reação com o solo, resultando em adobes mais homogêneos e menos porosos. Um dos principais benefícios observados foi a redução na absorção de água devido à insolubilidade da mistura, resultando em um efeito de cola entre as partículas.

2.5 Macrofungos

Os principais fungos conhecidos são os cogumelos, nos quais são macroscópicos e consistem em um corpo frutífero, micélio e hifas e se desenvolvem em lugares úmidos ao redor de todo o mundo. Atualmente, o uso dos cogumelos varia de acordo com a região, sendo empregados como alimento ou para fins medicinais (ANPC, 2013). Eles podem crescer naturalmente em ambiente selvagem ou serem cultivados, e após o processo de elaboração, tornam-se adequados para consumo como alimento (BRASIL, 2005).

Muitos fungos formadores de cogumelos podem ser cultivados em diferentes materiais lignocelulósicos, como palha, casca de semente de algodão, espigas de milho, casca de amendoim, algodão da indústria têxtil, polpa de café e papel (STAMETS, 2011).

A forma mais antiga de cultivo de cogumelos, provavelmente, é a cultura de toras ao ar livre, que tem sido praticada na China por pelo menos um milênio para o cultivo de shiitake. Atualmente, essa técnica foi amplamente substituída pelo cultivo interno mais eficiente em toras artificiais, que consistem em sacos plásticos preenchidos com substratos à base de serragem complementados com nutrientes. Uma vez que o saco esteja colonizado pelo micélio, ele é aberto para permitir a frutificação dos cogumelos. A serragem permanece coesa, mantida unida pelo micélio como uma cola (GRIMM; WÖSTEN, 2018).

O cultivo de cogumelo possui grande importância quando se trata de decomposição da matéria orgânica, devido à sua capacidade especializada de degradação, essa atividade ocorre principalmente durante a fase vegetativa ou micelial dos fungos, durante as fases vegetativa e reprodutiva, a formação de biomassa depende da produção de enzimas extracelulares, que desempenham um papel fundamental na degradação dos substratos, especialmente no componente lignocelulósico (VALÁZQUEZ-CEDEÑO *et al.*, 2002).

No Brasil, a produção de cogumelos é pequena e concentrada principalmente nos estados de São Paulo e Paraná, embora também existam produtores em Minas Gerais, Rio de Janeiro,

sul da Bahia, Pernambuco, Brasília e Rio Grande do Sul. O crescimento do número de produtores de cogumelos no país é dificultado pela falta de conhecimento para o cultivo e pela grande dependência das importações do produto proveniente da China (ANPC, 2013).

O cultivo de cogumelos é reconhecido por ser uma atividade de baixo custo e pode contribuir para mitigar os impactos ambientais causados pela destinação inadequada de resíduos agrícolas. Além disso, esse tipo de cultivo comercial ajuda a promover a preservação de recursos naturais e o desenvolvimento sustentável (MEYER *et al.*, 2020; ZÁRATE-SALAZAR *et al.*, 2020). Segundo Royse e Sánchez (2017), o *Pleurotus ostreatus*, conhecido popularmente como cogumelo ostra, hiratake ou shimeji, é o segundo cogumelo mais produzido mundialmente, representando 19,0% da produção global.

2.5.1 *Pleurotus ostreatus*

O gênero *Pleurotus* compreende aproximadamente 40 espécies, cuja distribuição varia de acordo com a região e a tolerância à temperatura de cada espécie específica (RAMAN *et al.*, 2021). Dentre essas espécies, *P. ostreatus*, *P. eryngii*, *P. djamor*, *P. citrinopileatus* e *P. pulmonarius* são reconhecidas por suas propriedades nutricionais, terapêuticas e farmacológicas (PATEL *et al.*, 2012).

Esses fungos pertencentes ao gênero *Pleurotus* secretam enzimas, como lacases, peroxidases e manganês peroxidase, que são capazes de degradar materiais lignocelulósicos. Na natureza, eles crescem em troncos de árvores e materiais orgânicos em processo de decomposição. Devido às altas taxas de crescimento micelial e às suas habilidades enzimáticas, essas espécies são facilmente cultivadas em diversos substratos, permitindo a decomposição eficiente de materiais lignocelulósicos (KNOP *et al.*, 2015; BELLETTINI *et al.*, 2016).

Vários estudos indicam que os fungos do gênero *Pleurotus* apresentam maior produtividade quando o substrato contém uma variedade de compostos. Por esse motivo, gramíneas, palhas, farelos e outros resíduos estão sendo incorporados aos processos de produção, visando aumentar a produção e valorizar diversos resíduos, tanto agroindustriais quanto urbanos (JATWA *et al.*, 2016; TIRKEY *et al.*, 2017; PRASAD *et al.*, 2018).

O *Pleurotus ostreatus* possui uma composição rica em nutrientes e apresenta propriedades antioxidantes, antimutagênicas e hepatoprotetoras. Além disso, ele pode ser cultivado usando tecnologias de baixo custo e proporciona uma alta rentabilidade econômica,

devido às suas altas taxas de conversão do substrato em corpos de frutificação (PATEL *et al.*, 2012; ESTRADA, 2017; OWAID *et al.*, 2017).

O *Pleurotus ostreatus* apresenta uma notável capacidade de adaptação a uma variedade de substratos residuais. Além disso, seu desenvolvimento é facilitado em temperaturas próximas a 30 °C, o que contribui para a ampla produção e comercialização dessa espécie em diversos países (URBEN, 2017). No entanto, a composição do substrato desempenha um grande papel na colonização e na eficiência da frutificação, tendo grande desafio para descarte do mesmo após cultivo (GRIMM; WÖSTEN, 2018).

2.6 Composto pós-cultivo de cogumelo (SMS)

Os resíduos agroindustriais, que possuem natureza lignocelulósica, podem ser aproveitados na produção de cogumelos comestíveis e medicinais. Após o término dessa produção de cogumelos, o material resultante é descartado e pode ser caracterizado como um substrato orgânico previamente degradado, ainda colonizado pelo fungo. No entanto, o conteúdo inicial de nutrientes desse substrato não corresponde ao seu conteúdo final, devido às alterações físico-químicas que ocorreram que não podem proporcionar novos ciclos de cultivo de cogumelos do fungo utilizado (ABREU, 2019).

O substrato exaurido de cogumelos, também conhecido como SMS (*spent mushroom substrate*) (FIGURA 1), é a biomassa residual que resulta do cultivo de cogumelos após a colheita. É composto por uma combinação de resíduos de materiais lignocelulósicos e micélio do cogumelo (PHAN; SABARATNAM, 2012).

A composição do SMS varia de acordo com a espécie fúngica utilizada e com a diversidade de materiais utilizados no seu método de preparo. Esses materiais podem incluir palha de trigo e arroz, resíduos de algodão, bagaço de cana-de-açúcar, serragem, polpa e casca de frutas, folha de bananeira, polpa de café, entre outros (SAAD *et al.*, 2017). De maneira geral, este material é rico em celulose, lignina, vitaminas e outras substâncias bioativas (LI *et al.*, 2020).

Figura 1 - *Spent mushroom substrate* (SMS) gerado a partir do *Pleurotus ostreatus*.



Fonte: Da autora (2023).

O SMS está disponível em grandes quantidades, pelo fato de que 1 kg de cogumelos frescos resulta em 5 kg de substrato usado (FINNEY *et al.* 2009), o que destaca a necessidade de encontrar alternativas para a reutilização desse material. Quando não há uma estratégia adequada para a reutilização do SMS, ele geralmente é descartado por meio de incineração, enterramento ou disposição em aterros sanitários, o que pode ter impactos negativos no meio ambiente (PHAN; SABARATNAM, 2012). É importante explorar opções sustentáveis para o gerenciamento desse resíduo, visando minimizar os impactos ambientais e encontrar formas de aproveitá-lo de maneira eficiente.

Na Holanda, em 1993, amostras de SMS foram coletadas em 620 fazendas de cogumelos e submetidas a análises para determinar a quantidade de matéria seca, fosfato, arsênico e sete metais pesados. Desde então, o uso de lodo de esgoto e outros tipos de compostos, incluindo o SMS, é regulamentado pelo Decreto de Uso e Qualidade de Outros Fertilizantes Orgânicos, conhecido como "BOOM" em holandês (MOORMAN, 1992, 1993).

Essa regulamentação detalhada exige que o SMS seja amostrado e analisado periodicamente para verificar a presença de metais pesados e arsênico. Dependendo dos níveis desses elementos no composto, será determinado se ele pode ser usado como adubo orgânico ou não, pois o principal uso de SMS no país é como fertilizante orgânico e para corrigir o solo na agricultura e horticultura. (GERRITS, 1994).

É importante ressaltar que os produtores de cogumelos em todo o mundo estão enfrentando pressão da opinião pública e das regulamentações ambientais para encontrar

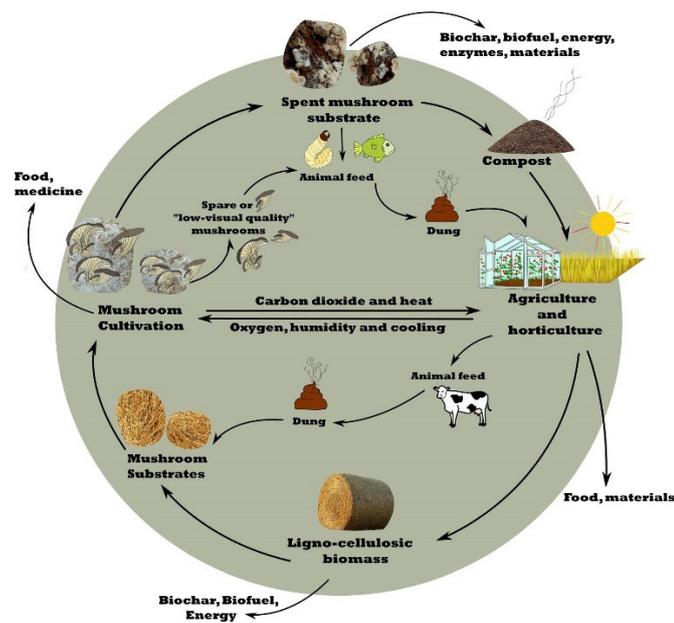
soluções adequadas para o SMS, com um foco especial na sua reciclagem. Como resultado, estão sendo realizadas pesquisas e desenvolvidos métodos para sua utilização e integração na economia circular (JASIUNAS *et al.*, 2017; HANAFI *et al.*, 2018).

2.7 Economia circular do SMS

A economia circular é um modelo que busca repensar as práticas econômicas da sociedade, tendo como inspiração o funcionamento dos sistemas naturais. Tem como objetivo criar um quadro de desenvolvimento sustentável, baseado no princípio de “fechar o ciclo de vida” dos produtos. Isso implica em reduzir o consumo de matérias-primas, energia e água, através da reutilização, reciclagem e recuperação de materiais ao final de seu ciclo de uso (MACARTHUR, *et al.* 2014).

Nessa abordagem, os resíduos agrícolas não são mais considerados um débito, mas sim recursos valiosos. O cultivo de fungos em substratos agrícolas pode ser uma prática sustentável, pois além de produzir cogumelos comestíveis e/ou medicinais, esse processo gera substrato residual de cogumelo (SMS) que pode ser aproveitado em diversas aplicações. O SMS costumava ser tratado como um resíduo, porém, em uma economia circular, há várias oportunidades para sua utilização, como mostrado na Figura 2 (GRIMM; WÖSTEN, 2018).

Figura 2 – Utilização do *Spent mushroom substrate* (SMS) na economia circular.



Fonte: GRIMM; WÖSTEN (2018).

2.7.1 SMS utilizado como substrato de cogumelo

Devido à sua viabilidade econômica e ambiental, o conceito de “economia circular” de reciclar SMS após a colheita do primeiro cultivo de cogumelo e reutilizá-lo em uma nova formulação de substrato para o cultivo de cogumelos começou por volta de 1970 (FLEGG; RANDLE, 1968). Os resíduos de cogumelos ainda contêm fibras e nutrientes que podem servir como uma fonte de carbono suficiente para permitir novos ciclos de cultivo de certos cogumelos comestíveis, desde que sejam submetidos ao tratamento adequado. Essa prática visa alcançar metas de redução de custos e aumento do rendimento geral (LEONG *et al.*, 2022).

Há também do cultivo sequencial de cogumelos de diferentes espécies, como por exemplo, após a interrupção da produção de *Lentinula edodes*, o substrato esterilizado foi empregado para o cultivo de *G. frondosa*, *P. eryngii* e *P. ostreatus*. Depois que a segunda espécie na sequência parou de produzir, o substrato esterilizado pode ser usado como nova formulação de substrato para o crescimento de *Coprinus comatus* ou *Stropharia rugosoannulata*. É importante destacar que a ordem das espécies de cogumelos nessa pesquisa segue o conceito de primeiro cultivar decompositores primários e depois decompositores secundários (STAMETS, 2011).

2.7.2 SMS utilizado para produção de energia

O método mais convencional para produzir bioenergia a partir da biomassa lignocelulósica é a queima, mas isso não é ambientalmente correto e desperdiça energia. Além disso, o alto índice alcalino de SMS leva a alto risco de formação de escória e incrustação (JASIUNAS *et al.*, 2017).

Diante da crescente demanda por biocombustíveis sustentáveis, há um interesse significativo na utilização do SMS como matéria-prima para a produção de biocombustíveis de segunda geração, visando criar um ciclo fechado sustentável de "resíduos para energia limpa", com benefícios adicionais de minimização de resíduos e redução das emissões de gases de efeito estufa (PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019).

Em comparação com outras matérias-primas de origem biológica, o SMS tem se mostrado uma promissora fonte de matéria-prima para a produção de biocombustíveis, devido ao fato de que os materiais lignocelulósicos pré-digeridos contêm nutrientes mais disponíveis

para a decomposição bacteriana e facilitam a conversão em biocombustíveis (PÉREZ-CHÁVEZ; MAYER; ALBERTÓ, 2019). Além disso, o SMS pode ser utilizado como fonte de açúcares para a produção de bioetanol (ZHU *et al.*, 2013).

2.7.3 SMS utilizado como biofertilizante

O SMS tem sido bem reconhecido como uma fonte de biofertilizante barata e sustentável. O substrato residual apresenta características como baixa densidade, textura solta, estrutura em pellets, boa permeabilidade ao ar e alta capacidade de retenção de água e nutrientes. Isso permite que ele melhore efetivamente a estrutura física do solo e o ambiente ecológico para os microrganismos do solo. Entre as várias aplicações potenciais do SMS na agricultura, a compostagem ainda é considerada a forma mais eficaz e economicamente viável de reciclagem do substrato residual (LOU *et al.*, 2017).

Por meio do tratamento com microrganismos benéficos apropriados, a nutrição e a atividade biológica do substrato são melhoradas, resultando em uma melhoria da qualidade do solo, aumento da eficiência agrônômica e garantia da segurança ambiental (HANAFI *et al.*, 2018).

2.7.4 SMS utilizado para alimentação animal

O substrato principal para o cultivo de cogumelos, como palha de trigo e espigas de milho, geralmente contém uma quantidade significativa de celulose e lignina, com apenas uma pequena quantidade de proteína (HANAFI *et al.*, 2018).

Os substratos residuais de cogumelos como *A. bisporus*, *L. edodes* e *P. eryngii* têm sido identificados como fontes de enzimas como xilanase, β -glucanase, lacase e fitase, que podem ser benéficas para a digestibilidade da ração animal. Além disso, o substrato residual também é rico em componentes bioativos, como polissacarídeos, vitaminas e oligoelementos, que têm benefícios na melhoria do equilíbrio da flora do trato digestivo em bovinos e aves, além de promover o crescimento desses animais (PAREDES *et al.*, 2009).

2.7.5 SMS utilizado para constituição de materiais

Os compósitos de micélio consistem em uma rede de hifas fúngicas que conectam as partículas do substrato, formando a maior parte do material. As propriedades desses compósitos, como resistência à compressão, flexibilidade e condutividade elétrica, dependem das espécies de fungos utilizadas, da matéria-prima, dos aditivos e das condições ambientais de crescimento (JONES *et al.*, 2017).

Os materiais de micélio, incluindo compostos de micélio e micélio puro, surgem como alternativas para substituir plásticos convencionais. Os fungos formadores de cogumelos são especialmente interessantes para a produção desses materiais devido à sua capacidade de formar extensas redes de hifas e sua eficiente colonização de materiais lignocelulósicos, como serragem e palha, presentes em fluxos de resíduos orgânicos de baixa qualidade (FERGUSON *et al.*, 2003).

Em geral, os compósitos de micélio possuem propriedades semelhantes às espumas poliméricas. Eles têm sido utilizados em embalagens (HOLT *et al.*, 2012), construção civil (XING *et al.*, 2018) e diversas outras aplicações propostas, como amortecedores acústicos, absorventes, papel, têxteis, peças automotivas e eletrônicas (JONES *et al.*, 2017).

Nos próximos anos, espera-se que o potencial total dos materiais compósitos de micélio seja mais explorado, incluindo o uso do SMS como material de partida para produzir biocompósitos (GRIMM; WÖSTEN, 2018).

2.8 Fungos e suas perspectivas na construção civil

Os compósitos à base de fungos têm o potencial de se tornarem substitutos promissores para materiais de construção, contribuindo para a redução dos impactos ambientais causados pela indústria da construção. Esses compósitos podem ser produzidos por meio de técnicas biotecnológicas, utilizando o cultivo de fungos multicelulares que formam micélios densos durante seu crescimento na biomassa vegetal residual da agricultura e silvicultura (STELZER, 2021).

Os compósitos sanduíche são caracterizados por uma estrutura de camadas onde as camadas externas são articuladas devido à ação de colagem do micélio que cresce no material do núcleo. O material do núcleo é semelhante a uma espuma à base de micélios (MBF) incluído

entre duas camadas de material lignocelulósico, que são colonizadas por sua vez e coladas ao próprio núcleo, resultando em um bloco único (GIROMETTA *et al.*, 2019).

A utilização de micélios como núcleo em estruturas de vigas sanduíches, é uma estratégia eficiente para aumentar a resistência à flexão, especialmente quando reforçadas com linho. A resistência está relacionada ao grau de colonização na placa e à aderência entre a placa e o núcleo, sendo influenciada pelo substrato utilizado. No entanto, acredita-se que a rigidez seja principalmente determinada pela resistência do núcleo, e a maior rigidez observada na viga sanduíche de celulose em comparação com os outros dois materiais de placa é devido à presença de um núcleo mais espesso (JIANG *et al.*, 2016).

O estudo conduzido por Houette *et al.* (2022) demonstra o potencial de duas espécies de fungos, *Pleurotus ostreatus* e *Coprinus comatus* para a produção de materiais de construção à base de micélio. Foram produzidos corpos de provas cilíndricos e retangulares através da inoculação dos fungos em palha lascada e peneirada. Esses corpos de provas, à base de micélio, apresentaram módulos de elasticidade e de Young comparáveis ou ligeiramente superiores a outros materiais similares. A densidade dos materiais compostos mostrou uma correlação positiva com o desempenho mecânico. O estudo da retração durante as fases de crescimento e secagem ofereceram informações valiosas para prever as dimensões finais dos materiais. Ambas as espécies de fungos apresentaram comportamento mecânico semelhante.

Uma avaliação do ciclo de vida foi realizada em tijolos compostos à base de fungos, tanto em escala laboratorial quanto em escala industrial. Segundo os resultados obtidos, os impactos considerados são principalmente impulsionados pelo consumo de eletricidade e pelos produtos agrícolas centeio e cânhamo, embora uma escala industrial possa reduzir o consumo de energia, em particular. A avaliação do ciclo de vida também revela uma redução na maioria das categorias de impacto em comparação com os tijolos de construção convencionais. Isso sugere que o uso de produtos à base de fungos produzidos em escala industrial como substitutos para materiais de construção, anteriormente utilizados pode resultar em uma menor pegada ambiental. No entanto, dado o uso de muitos produtos agrícolas na produção, o estudo aponta para um aumento no uso da terra e na eutrofização (STELZER, 2021).

A fabricação de tijolos de micélio biocompósitos como materiais de construção sustentáveis, utilizando resíduos agrícolas, apresenta perspectivas promissoras para o futuro da bioconstrução. A utilização de micélios na composição dos tijolos apresentou resistência à compressão aceitável, com diferentes composições sendo testadas. A incorporação de micélio

no teste de flexão melhorou a ductilidade dos corpos de prova dos tijolos, resultando em menos rachaduras. A presença de fibras observadas no microscópio estereoscópico evidenciou que as fibras naturais do micélio atuaram como um aglutinante para o material de construção (KANAGALAKHMI *et al.*, 2021).

Os compósitos à base de micélio (MBC) estão ganhando popularidade como alternativas regenerativas, biodegradáveis e leves, e estão sendo explorados em diversas aplicações. Métodos para aumentar o escopo da utilização de MBC em sistemas modulares e promover aplicações arquitetônicas estão sendo estudados. O desenvolvimento de MBC na forma de componentes modulares possibilita a criação de várias configurações geométricas sem a necessidade de peças adicionais para fixação. A compactação e a distribuição do material no processo de cultivo resultaram em uma maior densidade nas partículas compostas e arranjadas, melhorando a estabilidade dos módulos (ABDELHADY; SPYRIDONOS; DAHY, 2023).

Sob condições adequadas e com métodos específicos, o micélio pode ser utilizado como material de construção e em designs arquitetônicos. Um exemplo notável é a Hy-Fi Tower (FIGURA 3), projetada pelo arquiteto David Benjamin em Nova York. Essa torre é composta por um agrupamento de torres circulares, com altura de 3,6 metros, construídas com 10.000 tijolos cultivados a partir de talos de milho triturados naturalmente e micélio de fungos (ORAL-KARAKOÇ *et al.*, 2022).

Figura 3 – A primeira torre construída com tijolos de micélio de fungos (Hy-Fi Tower).



Fonte: ARUP (2014).

Além de materiais compósitos à base de micélio, estão sendo investigadas a eficácia, viabilidade e aplicabilidade da reciclagem do substrato exaurido de cogumelos (SMS) na aplicação em materiais de construção civil. Foi verificado em um estudo experimental que o SMS tem potencial para ser reciclado em concreto como agregado miúdo (PANG, 2007).

A quantidade de SMS que pode ser usado deve ser ajustada para se adequar ao projeto exigido ou à resistência especificada do concreto. Para facilitar o endurecimento do concreto e reduzir odores desagradáveis, é recomendado tratar o SMS com cal virgem ou cimento antes de adicioná-lo à mistura. A quantidade recomendada de cal virgem/cimento a ser utilizada é de 1/3 do teor de umidade do SMS em relação à sua massa. Essa quantidade resultará em uma redução de custos de material, além de proporcionar resistência e durabilidade aceitáveis ao concreto, desde que o teor de umidade do SMS não ultrapasse 60%. É possível substituir até 20% do agregado miúdo pelo SMS sem comprometer a resistência do concreto, mantendo-o dentro dos padrões da classe A (PANG, 2007).

Nesse âmbito, percebe-se que os materiais compostos à base de micélio de fungos desempenham um papel essencial na transição para uma indústria da construção mais sustentável e contribuem para a preservação do meio ambiente. Esses materiais apresentam características excepcionais, como leveza, resistência e isolamento térmico, tornando-os adequados para uma ampla gama de aplicações na construção, desde painéis de isolamento até tijolos ecológicos. Além disso, o uso de substrato gasto de cogumelo (SMS) permite aproveitar resíduos orgânicos, reduzindo o descarte inadequado e diminuindo a pressão sobre os recursos naturais. Ao optar por materiais compostos à base de micélio de fungos, estamos promovendo uma abordagem circular, na qual os recursos são reutilizados e os impactos ambientais são minimizados.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Estruturas e no Laboratório de Construção Civil do Departamento de Engenharia (DEG) e também no Laboratório de Microbiologia Agrícola do Departamento de Biologia (DBI), ambos da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais.

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em DIC com 4 tratamentos (composição de adobes) e 5 repetições. Os tratamentos foram: solo corrigido para controle (T1); solo corrigido com adição de 2% de cal hidratada e inoculação de 0,5% de semente do fungo *Pleurotus ostreatus* (T2); solo corrigido com adição de 12,5% de SMS fresco e 12,5% de partículas de bambu (T3); solo corrigido com adição de 25% de SMS fresco (T4).

3.3 Produção dos adobes

Para a produção dos adobes foi utilizada uma mistura de correção (SC) composta por duas partes de solo, com a granulometria apresentada na Tabela 1, e uma de areia.

Tabela 1 – Classificação granulométrica do solo utilizado na mistura.

Classificação do solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
	dag kg ⁻¹		
Tipo 3	58	26	16

Como estabilizantes utilizou-se SMS fresco, gerados a partir da produção de *Pleurotus ostreatus*, produzidos a partir de bagaço de cana-de-açúcar, feno e braquiária; partículas de *Bambusa tuldoides* (BT); sementes do fungo *Pleurotus ostreatus* e cal hidratada (TABELA 2).

Tabela 2 – Características físicas dos materiais utilizados na produção dos adobes.

Materiais	Umidade	Densidade aparente	Peneirado*
	%	kg dm ⁻³	-
Solo	-	1,140	Sim
Areia	-	1,444	Sim
SMS**	75	0,46	Não
BT	20	0,09	Sim
SC (seco)	-	1,275	Sim
SC (úmido)	33,95	-	Sim

* Foi utilizado a peneira malha 10.

** Desmanchado manualmente.

O procedimento para confecção dos adobes (FIGURA 4) foi adaptado da norma ABNT NBR 16814. Todos os adobes foram confeccionados em formas metálicas de dimensões de 380x180x80 mm, seguindo a NBR 16814 (FIGURA 5). Passaram pelo período de secagem de 45 dias (para estabilização da umidade e começo das avaliações), e foram armazenados no mesmo local de desmolde, protegidos do sol e intemperes.

Figura 4 – Confeção dos adobes. A - Homogeneização dos materiais secos. B - Adição da primeira água. C - Mistura após 24h de descanso. D - Adição de estabilizantes (no caso SMS). E - Adição do restante da água. F e G – Nova homogeneização da mistura com enxada e pés. H - Mistura resultante. I - Adição da mistura nas formas. J - Desmolde. K - Adobes antes da secagem.



Fonte: Da autora (2023).

Figura 5 – Forma metálica utilizada na confecção.



Fonte: Da autora (2023).

Foram confeccionados adobes compostos apenas com solo corrigido e areia média na proporção de 2:1 para controle (T1); solo corrigido com adição de 2% da massa seca de cal hidratada, inoculado 0,5% da massa seca de semente do fungo (T2); solo corrigido com adição de 12,5% do volume de partículas de bambu e 12,5% do volume de SMS (T3); solo corrigido com adição de 25% do volume de SMS (T4). A quantidade de materiais utilizados na produção de cada tratamento é especificada na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Quantificação dos materiais utilizados na produção dos adobes.

Tratamento	Solo	Areia	Cal	Bambu	SMS	Fungo
	(Kg)					
T1	90	45	-	-	-	-
T2	90	45	2,7	-	-	0,68
T3	68	34	-	1	4,84	-
T4	68	34	-	-	9,8	-
TOTAL	316	158	2,7	1	14,64	0,68

Os tratamentos foram realizados da seguinte forma:

T1 (tratamento controle): o solo e a areia média, previamente pesados (135 Kg), foram misturados com enxada. Posteriormente foi adicionado 30 litros de água e promovida nova homogeneização da mistura. Após descanso de 24 horas, acrescentou-se 17,5 litros de água, sendo feita uma homogeneização com os pés. A mistura resultante foi colocada nas formas

metálicas, untadas com desmoldante (óleo queimado e areia), preenchidas até completar seu volume e retiradas.

T2: o solo e a areia média, previamente pesados (135 Kg), foram misturados com enxada. Posteriormente foi adicionado 30 litros de água e promovida nova homogeneização da mistura. Após descanso de 24 horas, foi adicionado 2,7 Kg de cal hidratada diluído em 16,30 litros de água, sendo feita uma homogeneização com os pés. Posterior foi adicionado na mistura 0,680 Kg de semente de *Pleurotus ostreatus* e realizada a homogeneização final. A mistura resultante foi colocada nas formas metálicas, untadas com desmoldante (óleo queimado e areia), preenchidas até completar seu volume e retiradas.

T3: o solo e a areia média, previamente pesados (102 Kg), foram misturados com 4,84 Kg de SMS fresco desmanchados manualmente e 1 Kg de partículas de BT. Posteriormente foi adicionado 30 litros de água e promovida nova homogeneização da mistura. Após descanso de 24 horas, acrescentou-se mais 15 litros de água, sendo feita uma homogeneização com os pés. A mistura resultante foi colocada nas formas metálicas, untadas com desmoldante (óleo queimado e areia), preenchidas até completar seu volume e retiradas.

T4: o solo e a areia média, previamente pesados (102 Kg), foram misturados com 9,8 Kg de SMS fresco desmanchados manualmente. Posteriormente foi adicionado 25 litros de água e promovida nova homogeneização da mistura. Após descanso de 24 horas, acrescentou-se mais 15 litros de água, sendo feita uma homogeneização com os pés. A mistura resultante foi colocada nas formas metálicas, untadas com desmoldante (óleo queimado e areia), preenchidas até completar seu volume e retiradas.

Para a verificação da umidade ideal em cada tratamento foi realizado o ensaio de campo denominado “Queda da bola” (RUIZ; LUNA, 1983; BARBOSA; GHAVAMI, 2007). Para isso, foi realizado os seguintes procedimentos:

- a) formou-se uma bola com aproximadamente $\varnothing=80$ mm da amostra da mistura do adobe (FIGURA 6);
- b) a bola foi solta a uma altura de 1,5 m em piso plano e cimentado;
- c) no choque contra o piso mede-se a relação entre diâmetro e altura para verificar a quantidade de água na mistura: em altura menor que um terço do diâmetro a água foi excessiva; em altura igual a um terço do diâmetro a umidade está próxima do ideal; e em altura maior que um terço do diâmetro a água foi insuficiente.

Figura 6 – Teste “Queda da bola”.



Fonte: Da autora (2023).

3.4 Propriedades físicas

3.4.1 Densidade aparente e dimensões após secagem

Os valores médios de densidade aparente (DA) foram determinados seguindo-se a metodologia de Renzo (2023). As densidades aparentes das amostras foram calculadas gravimetricamente, dividindo o peso seco das amostras (g) pelo seu volume (cm³). O volume foi estimado através de múltiplas medições das dimensões da amostra em todas as três direções, utilizando uma régua (FIGURA 7).

Figura 7 – Medição das dimensões do adobe.

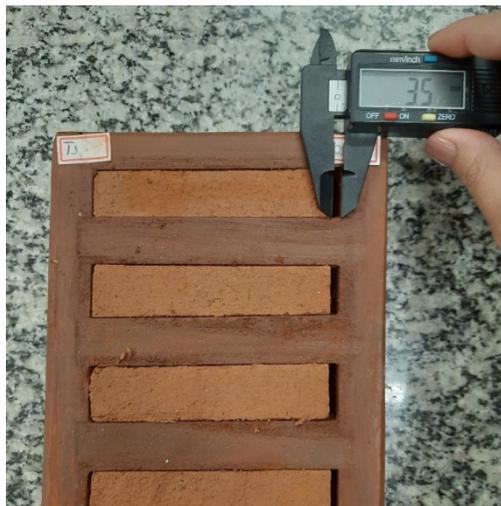


Fonte: Da autora (2023).

3.4.2 Retração linear

O ensaio de retração linear foi feito seguindo os procedimentos de Ruiz e Luna (1983). Utilizou-se uma caixa com 5 compartimentos (repetições) de dimensões de 10x2x2 cm, para cada tratamento. Os compartimentos foram preenchidos pela massa utilizada na confecção dos adobes, alisando a superfície para nivelar e ajustar cada amostra. Após o período de secagem (45 dias), mediu-se, com o auxílio de um paquímetro digital, a retração linear de cada tratamento (FIGURA 8).

Figura 8 – Medição da retração linear.



Fonte: Da autora (2023).

3.4.3 Absorção de água e capilaridade

A determinação da absorção de água e capilaridade foi realizada seguindo a metodologia adaptada de Araya-Letelier *et al.*, 2021. Os adobes foram secos em estufa a 60 °C por 24 horas, posteriormente foram expostos indiretamente à água em determinados intervalos. Para que acontecesse a exposição não direta em água os corpos de prova foram colocados sobre espumas saturadas de água, inseridas dentro de caixas plásticas (51 x 30 x 9 cm) com 1,5 litros de água. Os blocos foram pesados (medições da massa) e marcas de das lâminas de água dos tijolos foram anotadas (FIGURA 9). As medições foram nos seguintes tempos: 0, 1, 5, 10, 20, 30 e 60 min após a exposição indireta à água. Para calcular a absorção de água capilar usou-se a Equação 1.

$$I = \frac{\Delta m}{a \cdot d} \quad \text{Equação 1}$$

Onde I representa a taxa de absorção de água (%), Δm é a variação de massa entre duas medições consecutivas, a é a área da seção transversal exposta à absorção de água e d é a densidade da água.

Figura 9 – Ensaio de capilaridade e absorção de água. A) Submersão das esponjas em água.

B) Adição do adobe sobre a esponja saturada. C) Medição da altura de absorção de água.



Fonte: Da autora (2023).

3.5 Análise estatística

Os dados do experimento foram submetidos à análise de variância a 5% de significância, pelo teste F, e quando significativos, as médias serão comparadas pelo teste de Tukey com significância de 5%. O software utilizado foi o SISVAR 5.8 (FERREIRA, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade aparente e retração linear

A densidade aparente do adobe apresentou diferença significativa, conforme a Tabela 4, diminuindo com a incorporação de estabilizantes. O tratamento T4 foi o que registrou a maior redução, com uma diminuição de $0,25 \text{ g cm}^{-3}$ em comparação ao tratamento controle. Essa diminuição da densidade é devido a diferença das densidades aparentes dos materiais utilizados

na produção dos adobes, os estabilizantes utilizados apresentam uma densidade inferior do solo corrigido (TABELA 2), diminuindo assim a densidade aparente.

A diminuição da densidade aparente pode resultar em adobes mais leves, o que facilita a construção e transporte, além de reduzir a carga estrutural em edificações.

Tabela 4 – Caracterização da densidade aparente (g cm^{-3}) e retração (mm) dos adobes.

Tratamentos	Densidade aparente (g cm^{-3})	Retração (mm)
T1	1,46 b	3,54 c
T2	1,32 a	0,58 ab
T3	1,25 a	0,62 b
T4	1,21 a	0,04 a
CV (%)	4,45	25,10

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

A redução da densidade aparente é observada também por Gandia (2017), utilizando 0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10% de resíduos de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) na produção dos adobes. Foi observado que a densidade diminuiu à medida que a concentração do resíduo de PRFV aumentou. De acordo com o autor, um fator que explica essa redução da densidade é o aumento da porosidade do adobe pela movimentação das fibras em contato com o solo.

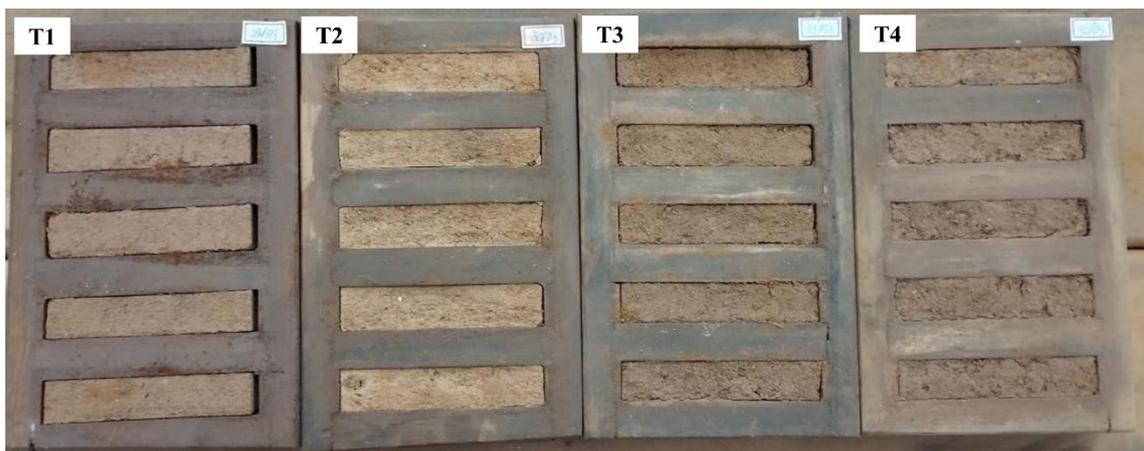
No estudo realizado por Renzo (2023), foram produzidos e avaliados adobes compostos por rejeito de mineração reforçados com bagaço de cana-de-açúcar e baba de cupim. Observou-se que a inserção dessas fibras vegetais resultou em uma redução significativa na densidade dos adobes. Destaca-se que o tratamento contendo 7% de bagaço registrou uma redução de aproximadamente 58% no valor da densidade aparente em comparação com o tratamento de referência. Segundo Renzo (2023), essa diminuição na densidade do adobe é atribuída à estrutura das fibras vegetais, que possuem uma densidade inferior à do rejeito. Além disso, a movimentação das fibras em contato com o rejeito pode explicar o possível aumento da porosidade do adobe, contribuindo para a redução da densidade.

A redução da densidade aparente é observada também por Corrêa *et al.* (2015), utilizando fibras de bambu na produção do adobe de 2 a 6%. A incorporação dessas partículas lignocelulósicas reduziu a densidade do adobe, devido ao aumento das porosidades na sua microestrutura.

Em relação à retração linear (TABELA 2), com a adição dos estabilizantes, houve uma redução na retração dos adobes. O tratamento T4 e T2 registraram a menor retração, com uma diminuição de 3,5 mm e 2,96 mm em comparação com o T1, respectivamente. Além disso, não foi possível observar fissuras nos corpos de prova (FIGURA 10). Essa redução na retração ocorre devido ao reforço das fibras de BT e SMS, que proporcionam uma estrutura ao adobe e impedem a sua retração à medida que a umidade diminui. Ao reduzir a retração por meio da adição desses estabilizantes, é possível obter adobes com maior estabilidade dimensional, minimizando fissuras e deformações indesejadas após a construção e aumentando a vida útil.

De acordo com Yetgin; Özlem; Ahmet (2008), a presença de uma maior quantidade de fibras naturais no adobe está associada a uma menor retração. Em um estudo realizado por Corrêa *et al.* (2015), utilizando fibras de bambu e bagaço de cana, também presentes neste trabalho, observou-se que a fibra de bagaço de cana teve um efeito significativo na redução da retração linear. As fibras de bambu, embora não tenham apresentado variações significativas, também contribuíram para a redução da retração.

Figura 10 – Resultados do ensaio de retração linear.



Fonte: Da autora (2023).

Na pesquisa realizada por Gandia (2017), também foi observada uma diminuição na retração com o acréscimo de resíduos de PRFV. Essa redução na retração ocorre devido ao armamento das fibras de resíduo de PRFV que estruturam o adobe que impedem a sua retração com a diminuição da umidade.

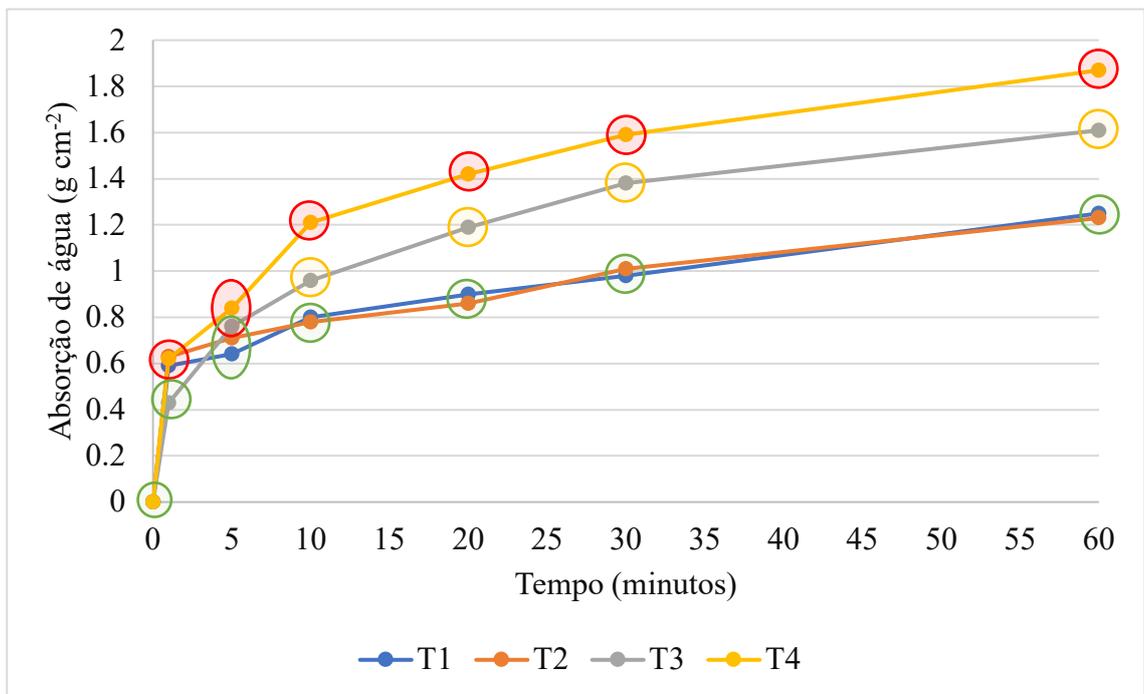
Renzo (2023) também realizou uma análise da retração linear dos adobes confeccionados. Observou-se retração no tratamento referência e nos adobes com diferentes

proporções de baba de cupim sintética. Já nos adobes com diferentes proporções de bagaço de cana, foi observada mais expansão do que retração.

4.2 Absorção de água e capilaridade

Os resultados referentes à absorção de água de todos os tratamentos estão apresentados na Figura 11 a seguir. Os tratamentos T1 e T2 obtiveram os melhores resultados de absorção de água a partir de 5 minutos em imersão em água. A maior absorção de água em 60 minutos foi observada para o tratamento com adição de 25% de SMS. A adição de estabilizantes fibrosos igual a 25% do volume, apesar de reduzir a densidade aparente, contribuíram para o aumento na absorção de água. Esse aumento na absorção de água pode ser explicado pela presença das fibras e dos micélios que geram o aumento da porosidade, o que possibilita a maior facilidade da infiltração da água. Além disso, a granulometria das fibras do SMS também pode ter contribuído para uma maior absorção de água. Possivelmente uma granulometria menor das fibras poderia reduzir essa absorção de água.

Figura 11 - Resultados médios de absorção de água (g cm^{-2}) dos adobes.



*Médias dentro da mesma marcação não diferem estatisticamente entre si, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Da autora (2023).

Em um estudo conduzido por Corrêa *et al.* (2015), utilizando fibras de bagaço de cana e bambu em proporções de 2%, 4% e 6% em massa para adobes, apresenta resultados

semelhantes ao observados. Nesse estudo, notou-se que quanto maior a adição de fibras, maior era a absorção de água pelos adobes.

A presença das partículas do resíduo de PRFV no adobe, embora reforcem sua estrutura, contribuíram para o aumento na absorção de água (GANDIA, 2017).

Renzo (2023) observou que o tratamento com 7% de bagaço de cana, ou seja, com adição de fibras, apresentou a maior absorção de água em 60 minutos, enquanto os demais tratamentos apresentaram uma absorção de água menor do que o tratamento de referência.

Babé *et al.* (2021) observou o aumento no coeficiente de absorção de água nos adobes reforçados com as fibras de nem (*Azadirachta Indica*), concluindo que os resultados são devido à natureza do material de reforço, rico em celulose, facilitando a absorção de água.

Conforme a norma NBR 8492 (ABNT, 1984), a absorção de água em tijolos solo-cimento deve ser inferior a 18%. De acordo com a Tabela 5, todos os tratamentos atenderam a norma, registrando valores abaixo do limite máximo permitido. O tratamento T1 e T2 obtiveram a menor taxa de absorção, com 11,87% e 12,01% respectivamente.

Tabela 5 – Absorção de água (%), pelo método da NBR 8492 de tijolo solo-cimento, após imersão de 60 minutos dos adobes.

	T1	T2	T3	T4
Absorção de água (%)	11,87 a	12,01 a	17,48 b	17,98 b
CV (%)	8,99			

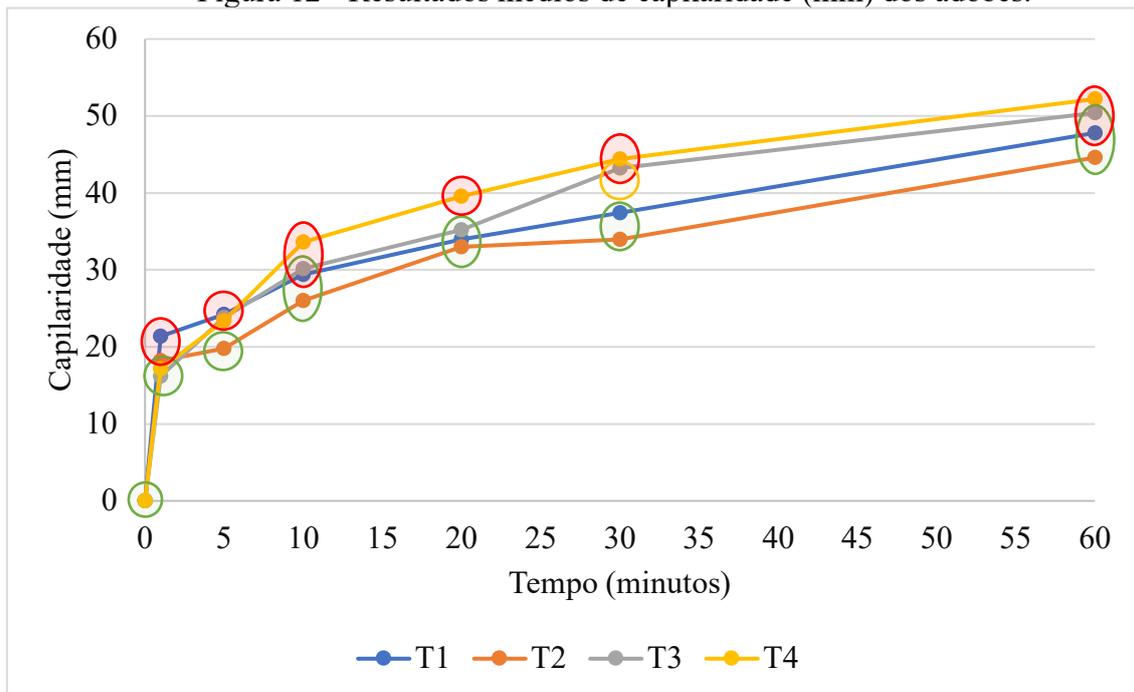
*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Quanto ao estudo da capilaridade (FIGURA 12), os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram menores alturas da água ascendente nos tempos de medição de 5, 10, 20, 30 e 60 minutos. O T4 obteve os maiores resultados de altura da água ascendente, podendo ser observado a partir do tempo de 5 minutos, essa ocorrência pode ser atribuída às fibras de SMS, que geraram microfissuras permitindo a entrada de água.

Corrêa *et al.* (2015) também observaram um aumento na altura de capilaridade quando adicionado estabilizantes fibrosos até 6% da massa. O aumento das partículas lignocelulósicas no adobe resultou em uma maior capilaridade devido às propriedades hidrofílicas das fibras.

Gandia (2017) também observou um efeito semelhante. O aumento da quantidade de resíduo de PRFV resultou em um aumento na altura da água ascendente em comparação ao tratamento controle.

Figura 12 - Resultados médios de capilaridade (mm) dos adobes.



*Médias dentro da mesma marcação não diferem estatisticamente entre si, pelo teste Tukey ($p < 0,05$).
Fonte: Da autora (2023).

Em um estudo realizado por Renzo (2023), foi observado resultados diferentes em relação à capilaridade. Verificou-se que a adição de bagaço de cana e baba de cupim na matriz de rejeito reduz a capilaridade. Os resultados demonstraram que a altura da água ascendente diminuiu com menores concentrações de bagaço de cana e maior concentração de baba de cupim.

5 CONCLUSÃO

A utilização de *Pleurotus ostreatus*, tanto em semente quanto em SMS, reduz a densidade aparente, em até $0,25 \text{ g cm}^{-3}$, e a retração linear dos adobes, em até 3,5 mm.

Para as características de absorção de água e capilaridade a adição dos estabilizantes reduziram a sua qualidade em relação ao adobe convencional.

A utilização de sementes de *Pleurotus ostreatus* bem como o substrato exaurido deste fungo (SMS) em compósitos de adobe (biocompósitos), revelam um caminho promissor para aprimorar as características desse material de construção. No entanto, requer mais estudos para investigar as melhores proporções destes materiais na composição de adobes. Essa abordagem

inovadora pode contribuir para o avanço da construção sustentável, promovendo soluções mais eficientes e ambientalmente conscientes.

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*, v. 7, n. 1, p. 20, 2023.

ABREU, C. G. de. **Utilização do substrato pós-cultivo (SMS) de *Agaricus subrufescens* e *Pleurotus ostreatus* na produção de alface e rúcula**. 2019. 79 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

ANPC. (2013). Cogumelos. Associação Nacional dos Produtores de Cogumelos. <<https://www.anpccogumelos.org/>> Acessado em 09 de junho de 2023.

ARAYA-LETELIER, G. *et al.* **Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers**. Construction and Building Materials, v. 276, p. 122127, 2021.

ARUP. **Hy-Fi reinvents the brick**. 2014. Disponível em: <<https://www.arup.com/news-and-events/hyfi-reinvents-the-brick>> Acessado em 11 de junho de 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10834: **Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994. 06 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16814: **Adobe - Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 32 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492: **Tijolo Maciço de Solo-Cimento – Determinação da Resistência à Compressão e da Absorção de Água. Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 02 p.

BABÉ, C. *et al.* **Effect of neem (*Azadirachta Indica*) fibers on mechanical, thermal and durability properties of adobe bricks**. Energy Reports, v. 7, p. 686-698, 2021.

BALAEŞ, T.; RADU, B.-M.; TĂNASE, C. **Mycelium-Composite Materials—A Promising Alternative to Plastics?**. Journal of Fungi, v. 9, n. 2, p. 210, 2023.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. In: ISAIA, G.C. (Org.). Terra crua. São Paulo: Ibracon, 2007. v. 2, p. 1505-1557.

BARBOSA, N. P.; GHAVAMI, K. **Solo crua para edificações**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: Ibracon, 2007.

BELLETTINI, M. B. *et al.* **Factors affecting mushroom *Pleurotus spp.*** Saudi Journal of Biological Sciences, v. 26, n 4, p. 633-646, 2016.

BITTING, S. *et al.* **Challenges and opportunities in scaling up architectural applications of mycelium-based materials with digital fabrication**. Biomimetics, v. 7, n. 2, p. 44, 2022.

BNH – Banco Nacional da Habitação (1985). **Uniformização das técnicas de aplicação do solo-cimento na construção habitacional**. Rio de Janeiro: DEPEA/BNH. 14 p, 1985.

BOUTH, J. A. C. **Estudo da potencialidade da produção de tijolos de adobe misturado com outros materiais: uma alternativa de baixo custo para a construção civil**. 2005. 82 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.

BRASIL. **Resolução RDC nº 272 de 22 de setembro de 2005**. Aprova o regulamento técnico para produtos de vegetais, produtos de frutas e cogumelos comestíveis. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2005.

BRILHANTE, F. D. F. *et al.* **Avaliação e desenvolvimento de tijolos de adobe com adição de palha de arroz. Agronegócio e sustentabilidade: métodos, técnicas, inovação e gestão**, v. 1, n. 1, p. 93-105, 2021.

CALATAN, G. *et al.* **Determining the optimum addition of vegetable materials in adobe bricks**. Procedia technology, v. 22, p. 259-265, 2016.

CALLISTER, Jr., WILLIAM, D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**, 1ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CANTEIRO, F.; PISANI, M. A. J. **Taipa de mão: História e Contemporaneidade**. *Ac ensaios*, v. 1, n. 2, p. 2-21, 2006.

CARVALHO, T. M. P. de; LOPES, W. G. R. **A arquitetura de solo e o desenvolvimento sustentável na construção civil**. In: Congresso norte nordeste de pesquisa e inovação, 7. 2012, Palmas. Anais [...]. Palmas: CONEPI, 2012. p. 1 -7.

CORRÊA, A. A. R. **Incorporação de partículas lignocelulósicas e “baba de cupim sintética” no adobe**. 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

CORRÊA, A. A. R., *et al.* **Incorporation of bamboo particles and “synthetic termite saliva” in adobes**. *Construction and Building Materials*. v. 98, p. 250-256, 2015.

COSTA, H. N. *et al.* **Avaliação de tijolos de adobe com adição de cinzas e fibras do coco**. 2014.

ROCHA, R. R. *et al.* **Resistência mecânica de tijolos “adobe” reforçados com resíduos industriais**. In: *Colloquium Exactarum*. 2021. p. 30-37.

DETHIER, J. **A back-to-earth approach to housing**. Unesco, Courier. p. 31-33, 1985.

DETHIER, J. **Arquitetura de Solo ou o futuro de uma tradição milenar**. Rio de Janeiro: Avenir, 1982.

MACARTHUR, E. *et al.* **Towards the circular economy: Accelerating the scale-up across global supply chains**. In: World Economic Forum. 2014.

FARIA, O. B. **Utilização de macrófitas aquáticas na produção de adobe: um estudo no reservatório de Salto Grande (Americana- SP)**. 2002. 200p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FERGUSON, B. A. *et al.* **Coarse-scale population structure of pathogenic**. 2003.

FERREIRA, D. F. **SISVAR: um sistema de computador de análise estatística**. Revista Brasileira de Biometria, Lavras, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.

FINNEY, K. N. *et al.* **The reuse of spent mushroom compost and coal tailings for energy recovery: comparison of thermal treatment technologies**. Bioresource technology, v. 100, n. 1, p. 310-315, 2009.

FLEGG, P. B.; RANDLE, P. E. **Re-use of mushroom bed compost**. MGA Bull, v. 223, p. 363-378, 1968.

GALÁN-MARÍN, C.; RIVERA-GÓMEZ, C.; PETRIC, J. **Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 8, p. 1462-1468, 2010.

GANDIA, R. M. *et al.* **Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with “synthetic termite saliva”**. Engenharia Agrícola, v. 39, p. 139-149, 2019.

GANDIA, R.M. **Avaliação do comportamento físico, mecânico, térmico e energético de adobes com e sem estabilização**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

GERRITS, J. P. G. **Composition, use and legislation of spent mushroom substrate in the Netherlands**. Compost Science & Utilization, v. 2, n. 3, p. 24-30, 1994.

GIROMETTA, C. *et al.* **Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: A review**. Sustainability, v. 11, n. 1, p. 281, 2019.

GOMES, M.V. **Arqueologia da Arquitectura de solo em Portugal**. In: Arquitectura de solo em Portugal (p.125-131). Lisboa: Argumentum, 2005.

GRIMM, D.; WÖSTEN, H. A.B. **Mushroom cultivation in the circular economy**. Applied microbiology and biotechnology, v. 102, p. 7795-7803, 2018.

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

HOUETTE, T. *et al.* **Growth and Mechanical Characterization of Mycelium-Based Composites towards Future Bioremediation and Food Production in the Material Manufacturing Cycle**. Biomimetics, v. 7, n. 3, p. 103, 2022.

JASIŪNAS, L. *et al.* **Biocrude production via supercritical hydrothermal co-liquefaction of spent mushroom compost and aspen wood sawdust**. Renewable Energy, v. 111, p. 392-398, 2017.

JATWA, T. K. *et al.* **Evaluation of Various Agro-Wastes for Production of Pleurotus spp. (P. florida, P. sajor-caju and P. eous)**. J. Pure. Appl. Microbiol, v. 10, p. 2783-2792, 2016.

JIANG, L. *et al.* **A new approach to manufacturing biocomposite sandwich structures: Mycelium-based cores.** In: International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2016. p. V001T02A025.

JONES, M. *et al.* **Mycelium composites: a review of engineering characteristics and growth kinetics.** Journal of Bionanoscience, v. 11, n. 4, p. 241-257, 2017.

JUNIOR, A. N. S. *et al.* **Avaliação física e mecânica de blocos de adobe, uma opção ecologicamente correta às atuais casas de taipa.** Acta Tecnológica, v. 14, n. 1, p. 55-65, 2021.

KANAGALAKHMI. A. S. *et al.* **Study on mycelium bricks.** Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, v. 8, p. 1-6, 2021.

KHALILI, E. **Earthquake resistant building structure employing sandbags.** U.S. Patent n. 5,934,027, 1999.

KNOP, D.; YARDEN, O.; HADAR, Y. **The ligninolytic peroxidases in the genus Pleurotus: divergence in activities, expression, and potential applications.** Applied Microbiology and Biotechnology, v. 99, p. 1025-1038, 2015.

LEMOS, C. - **Arquitetura Brasileira.** São Paulo: Melhoramentos EDUSP/ Universidade de São Paulo, 1979. 158 p.

LEONG, Y. K. *et al.* **Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): A review.** Bioresource technology, v. 344, p. 126157, 2022.

LI, F. *et al.* **Spent mushroom substrates affect soil humus composition, microbial biomass and functional diversity in paddy fields.** Applied soil ecology, v. 149, p. 103489, 2020.

LI, K. *et al.* **Recent advances in the construction of biocomposites based on fungal mycelia.** Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, v. 10, p. 1067869, 2022.

LIBRELOTTO, L. I. *et al.* **Construção com terra: passado e futuro.** IMPACT projects, v. 1, n. 2, p. 27-48, 2022.

LIMA, A. M. V. **Caracterização do comportamento à fractura de materiais compósitos.** 1997. 106p. Tese - Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, Porto, 1997.

LOU, Z. *et al.* **Nutrient conservation during spent mushroom compost application using spent mushroom substrate derived biochar.** Chemosphere, v. 169, p. 23-31, 2017.

MEYER, V. *et al.* **Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper.** Fungal biology and biotechnology, v. 7, n. 1, p. 1-23, 2020.

MILLOGO, Y. *et al.* **Earth blocks stabilized by cow-dung.** Materials and Structures, v. 49, p. 4583-4594, 2016.

MINKE, G. **Manual de construccion en tierra: Ia tierra como material de construcción y sus aplicaciones em Ia architecture actual.** Uruguay: Nordan-Comunidad, 2001.

MOHD HANAFAI, F. H. *et al.* **Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate (SMS): an overview.** Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 20, p. 1383-1396, 2018.

MONTORO, P. **Como Construir Paredes de Taipa. Folheto: “workshop” sobre paredes de taipa, - SP.** Produzido pelo ILAM - Instituto Latino Americano, São Paulo, 1994.

MOORMAN, G. J. W. **Champost en wetgeving.** De Champignoncultuur, v. 36, n. 2, p. 87-89, 1992.

MOORMAN, G. J. W. **Champost onder regelgeving (BOOM).** De Champignoncultuur, v. 37, n. 2, p. 33-37, 1993.

MOTA, D. M. P. *et al.* **Aprimoramento do tijolo adobe com adição de fibras da cana-de-açúcar.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 9, p. 253-264, 2020.

MUÑOZ, P. *et al.* **Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties.** Construction and Building Materials, v. 254, p. 119-314, 2020.

NIROUMAND, H.; ZAIN, M. F. M.; JAMIL, M. **A guideline for assessing of critical parameters on Earth architecture and Earth buildings as a sustainable architecture in various countries.** Renewable and sustainable energy reviews, v. 28, p. 130-165, 2013.

NORMA TÉCNICA DE EDIFICACIÓN. **NTE E.080: Regulamento Nacional Construcciones.** Lima, 2000. 17 p.

OLENDER, M. C. H. L. **A técnica do Pau-a-pique: subsídios para a sua preservação.** 2006, 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/12298/1/A%20T%C3%A9cnica%20do%20Pau%20a%20Pique%20Subs%C3%ADdios%20para%20a%20sua%20Preserva%C3%A7%C3%A3o.pdf>> > Acessado em 06 de junho de 2023.

ORAL-KARAKOÇ, H. *et al.* **Myco-hills: an experimental research on mycelium based building blocks.** In: ABBAS, G. M. *et al.* (Ed.). Materiart: Architectural Design, Research and Technology. 2022. P. 61-74.

OWAID, M. N.; ABED, I. A.; AL-SAEEDI, S. S. S. **Applicable properties of the bio-fertilizer spent mushroom substrate in organic systems as a byproduct from the cultivation of Pleurotus spp.** Information Processing in Agriculture, v. 4, n. 1, p. 78-82, 2017.

PALAZZO, P. P. **Taipas e fundações-TAU 0005 História da Arquitetura e da Arte I** (palazzo.arq.br). Material didático. Agosto de 2021. Disponível em: <<https://palazzo.arq.br/tao/aula/taipa> <<https://palazzo.arq.br/tao0005/aula/taipa/>> > Acessado em 05 de junho de 2023.

PANG, X. **Beneficial Use of Spent Mushroom Substrate in the Construction Industry.** 2007. Tese de Doutorado. Villanova University, 2007.

PAREDES, C. *et al.* **Characterization of the different organic matter fractions of spent mushroom substrate.** Communications in soil science and plant analysis, v. 40, n. 1-6, p. 150-161, 2009.

PATEL, Y.; NARAIAN, R.; SINGH, V. K. **Medicinal properties of Pleurotus species (oyster mushroom): a review.** World Journal of Fungal and Plant Biology, v. 3, n. 1, p. 1-12, 2012.

PÉREZ-CHÁVEZ, A. M.; MAYER, L.; ALBERTÓ, E. **Mushroom cultivation and biogas production: A sustainable reuse of organic resources.** Energy for Sustainable Development, v. 50, p. 50-60, 2019.

PHAN, C. W.; SABARATNAM, V. **Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes.** Applied microbiology and biotechnology, v. 96, n. 4, p. 863-873, 2012.

PRASAD, S. *et al.* **Yield and proximate composition of Pleurotus florida cultivated on wheat straw supplemented with perennial grasses.** Indian J. Agric. Sci, v. 88, p. 91-94, 2018.

QIN, P. *et al.* **Extraction and utilization of active substances from edible fungi substrate and residue: A review.** Food Chemistry, p. 133872, 2022.

RAMAN, J. *et al.* **Cultivation and nutritional value of prominent Pleurotus spp.: an overview.** Mycobiology, v. 49, n. 1, p. 1-14, 2021.

RAO, W. *et al.* **Recycling of spent mushroom substrate biowaste as an Anti-UV agent for Bacillus thuringiensis.** Sustainable Chemistry and Pharmacy, v. 30, p. 100-811, 2022.

RENZO, R. **Uso de rejeito de mineração, bagaço de cana e baba de cupim sintética na produção de adobes.** 2023. 72 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Biomateriais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2023.

RINKER, D. L. **Spent mushroom substrate uses.** Edible and medicinal mushrooms: Technology and applications, p. 427-454, 2017.

RODRIGUEZ, A. E.; PECCHIA, J. **Cultivation of Pleurotus ostreatus.** Edible and medicinal mushrooms: technology and applications, p. 339-360, 2017.

ROYSE, D. J.; SÁNCHEZ, J. E. **Producción mundial de setas Pleurotus spp. con énfasis en países iberoamericanos.** La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas Pleurotus spp. El Colegio de la Frontera Sur. Tapachula, p. 17-25, 2017.

RUIZ, L. E. H.; LUNA, J. A. M. **Cartilha de pruebas de campo.** Conescal. 72 p, 1983.

SAAD, A. L. M. *et al.* **Aproveitamento de resíduos agrícolas no cultivo do cogumelo medicinal *Ganoderma lucidum* utilizando a tecnologia chinesa “JunCao”**. *Ambiência*, Guarapuava, v. 13, n. 3, p. 271-283, 2017.

SALIH, M. M.; OSOFERO, I.; IMBABI, M. S. **Critical review of recent development in fiber reinforced adobe bricks for sustainable construction**. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v. 14, p. 839-854, 2020.

SANTOS, D. P.; BESSA, S. A. L. **O uso do adobe no Brasil: uma revisão de literatura**. *Mix sustentável*, v. 6, n. 1, p. 53-66, 2020.

SAVASTANO JR, H. *et al.* **Fibras vegetais para construção civil: a fibra de coco**. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo, 1986.

STAMETS, Paul. **Growing gourmet and medicinal mushrooms**. Ten speed press, 2011.

STELZER, L. *et al.* **Life cycle assessment of fungal-based composite bricks**. *Sustainability*, v. 13, n. 21, p. 11573, 2021.

TIRKEY, V. J.; SIMON, S.; LAL, A. A. **Efficacy of different substrates on the growth, yield and nutritional composition of oyster mushroom-*Pleurotus florida* (Mont.) Singer**. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, v. 6, n. 4, p. 1097-1100, 2017.

TORGAL, F. P. R.; EIRES, R.; JALALI, S. **Construção em solo**. TecMinho, 2009. Universidade do Minho. Portugal, 2009. 187 p.

URBEN, A. F. *et al.* **Produção de cogumelos por meio de tecnologia chinesa modificada: biotecnologia e aplicações na agricultura e na saúde**. 3. Ed. Brasília-DF. Embrapa, 2017.

VARUM, H. *et al.* **Caracterização dos solos e adobes usados na construção los Camabatelas**, Angola. Aveiro, Argumentum p, p. 94-96, 2007.

VELÁZQUEZ-CEDENO, M. A.; MATA, G.; SAVOIE, J.-M. **Waste-reducing cultivation of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius* on coffee pulp: changes in the production of some lignocellulolytic enzymes**. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 18, p. 201-207, 2002.

VYNCKE, J.; KUPERS, L.; DENIES, N. **Earth as Building Material – an overview of RILEM activities and recent Innovations in Geotechnics**. Belgian Building Research Institute, 2018. Disponível em: <// <https://pdfs.semanticscholar.org/eac6/d55a0fa5fe87d92a0b3f5034bc745216b90a.pdf>.> Acessado em: 06 de junho de 2023.

XING, Y. *et al.* **Growing and testing mycelium bricks as building insulation materials**. In: *IOP conference series: earth and environmental science*. IOP Publishing, 2018. p. 022032.

YETGIN, Ş.; ÇAVDAR, Ö.; CAVDAR, A. **The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes**. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 3, p. 222-227, 2008.

ZÁRATE-SALAZAR, J. R. *et al.* **Use of lignocellulosic corn and rice wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* Jacq.) cultivation.** SN applied Sciences, v. 2, p. 1-10, 2020.

ZHANG, X. *et al.* **Naturally grown mycelium composite as sustainable building insulation materials.** Journal of Cleaner Production, v. 342, p. 130-784, 2022.

ZHU, H. J. *et al.* **Combined alkali and acid pretreatment of spent mushroom substrate for reducing sugar and biofertilizer production.** Bioresource technology, v. 136, p. 257-266, 2013.