



**MARINA RESENDE RIBEIRO DE OLIVEIRA**

**ADOBES PRODUZIDOS A PARTIR DO REJEITO DE  
MINERAÇÃO E DA LIGNINA KRAFT**

**LAVRAS – MG  
2023**

**MARINA RESENDE RIBEIRO DE OLIVEIRA**

**ADOBES PRODUZIDOS A PARTIR DO REJEITO DE MINERAÇÃO E DA LIGNINA  
KRAFT**

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

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes  
Orientador

Prof. Dr. Mario Guimarães Junior  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2023**

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

Oliveira, Marina Resende Ribeiro de.

Adobes produzidos a partir do rejeito de mineração e da lignina  
Kraft / Marina Resende Ribeiro de Oliveira. - 2023.

59 p.: il.

Orientador (a): Lourival Marin Mendes.

Coorientador (a): Mário Guimarães Júnior.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Confecção de tijolos de adobe. 2. Rejeito de mineração como  
material construtivo. 3. Lignina Kraft como estabilizante no adobe.

I. Mendes, Lourival Marin. II. Júnior, Mário Guimarães. III. Título.

**MARINA RESENDE RIBEIRO DE OLIVEIRA**

**ADOBES PRODUZIDOS A PARTIR DO REJEITO DE MINERAÇÃO E DA LIGNINA KRAFT**

**ADOBES PRODUCED FROM MINING WASTE AND KRAFT LIGNIN**

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

APROVADA em 26 de maio de 2023.

Dr. José Benedito Guimarães Júnior – UFLA

Dra. Andrea Aparecida Ribeiro Corrêa – UFLA

Dr. Mário Vanoli Scatolino – UFERSA

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes  
**Orientador**

Prof. Dr. Mario Guimarães Junior  
**Coorientador**

**LAVRAS – MG  
2023**

## AGRADECIMENTOS

À minha família, minha querida mãe, pai e irmãos, por terem moldado a minha base, possibilitando que eu chegasse até aqui.

Ao meu amor e companheiro de vida, Danilo, que com toda paciência e carinho me fortaleceu nos momentos de dúvida, viabilizando conquistas e novos planos.

Aos meus filhos, Tomás e Camila, que despertaram uma versão melhor de mim mesma.

À minha sogra, Rosemeire, que foi amiga e rede de apoio para nossa família, com as crianças, casa e comida. Sem sua presença ativa, esse mestrado não seria possível. Obrigada por tudo.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais (PPGBIOMAT) pela possibilidade de realizar o mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pela pelo apoio e concessão da bolsa. A RENOVA, pela possibilidade de realização do projeto.

Ao professor, Dr. Lourival, orientador e amigo, pelo conselhos, atenção, orientação e apoio de sempre.

Ao professor, Dr. Mário Guimarães, pela amizade, pela solicitude e bondade, coorientação e auxílio no desenvolvimento do projeto e do trabalho como um todo.

Às minhas amigas da pós, Ianca e Karine, que me “estenderam a mão” quando precisei de alguém para ajudar a cuidar da pequena Camila enquanto eu escrevia.

Aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pelo companheirismo, empatia, amizade e ajuda.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pelos ensinamentos e incentivo.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho, meu muito obrigada.

## RESUMO

Uma das bases da economia brasileira é a mineração, que gera no processo milhões de toneladas de rejeito anualmente. Esse rejeito é depositado em barragens de contenção, se tornando um risco em potencial. No ano de 2015, na cidade de Mariana-MG, ocorreu o que ficaria conhecido como o maior desastre ambiental da história do Brasil, que foi o rompimento da barragem do Fundão. Depois, no ano de 2019, outra barragem de rejeitos rompeu, dessa vez em Brumadinho-MG. Assim, estudos que visem uma destinação mais adequada ao rejeito de mineração são de grande importância. O objetivo do trabalho foi avaliar o uso do rejeito na produção de adobes e sua estabilização com lignina Kraft (LK), que é um polímero orgânico natural, renovável e hidrofóbico. Foram confeccionados adobes com 0%, 0,5%, 1%, 2%, 4% e 8% de LK na matriz, com relação a massa seca do rejeito. Após moldados, os adobes ficaram em ambiente protegido das intempéries até a completa secagem. Para as propriedades mecânicas, os adobes com 2% de LK se destacaram com um módulo de ruptura de 0,64 MPa e um módulo de elasticidade de 75,5 MPa. O tratamento sem lignina obteve a maior resistência a compressão, sendo essa de 1,20 MPa, seguido do adobe com 2% de LK, com resistência a compressão de 1 MPa. Para a propriedade de absorção de água, no geral todos os adobes com LK obtiveram melhores resultados que o tratamento controle, com destaque para os adobes com 2%, 4% e 8% de LK, com valores de 3,8 % de absorção de água. Para o ensaio de perda de massa (erodibilidade), os adobes com 4% de LK tiveram a menor perda: 0,23 g. No teste de ângulo de contato, os adobes com 4% de LK foram os mais hidrofóbicos, apresentando ângulo de 87,3 °. Dessa forma, o rejeito proveniente do rompimento da barragem apresenta potencial para a produção de adobes, o qual sua principal aplicação é em paredes de vedação. Além disso, pode-se afirmar que os adobes com lignina Kraft ficaram coesos e resistentes aos impactos da gotícula de água em sua superfície, evidenciando o efeito aglutinante e estabilizante da lignina Kraft no rejeito de mineração.

**Palavras-chave:** Estabilizante. Erodibilidade. Hidrofobicidade. Bloco de terra crua.

## ABSTRACT

One of the bases of the Brazilian economy is mining, which generates millions of tons of waste annually in the process. This waste is deposited in containment dams, becoming a potential risk. In 2015, in the city of Mariana-MG, what would become known as the biggest environmental disaster in the history of Brazil occurred, which was the rupture of the Fundão dam. Then, in 2019, another tailings dam broke, this time in Brumadinho-MG. Thus, studies aimed at a more appropriate destination for mining waste are of great importance. The objective of this work was to evaluate the use of waste in the production of adobes and its stabilization with Kraft lignin (KL), which is a natural, renewable and hydrophobic organic polymer. Adobes were made with 0%, 0.5%, 1%, 2%, 4% and 8% KL in the matrix, in relation to the dry mass of the waste. After molding, the adobes were kept in an environment protected from the weather until completely dry. For mechanical properties, adobes with 2% LK stood out with a rupture modulus of 0.64 MPa and an elastic modulus of 75.5 MPa. The treatment without lignin had the highest compressive strength, which was 1.20 MPa, followed by adobe with 2% LK, with a compressive strength of 1 MPa. For the property of water absorption, in general, all adobes with LK obtained better results than the control treatment, especially the adobes with 2%, 4% and 8% of LK, with values of 3.8% of water absorption. water. For the mass loss test (erodibility), the adobes with 4% KL had the lowest loss: 0.23 g. In the contact angle test, adobes with 4% KL were the most hydrophobic, with an angle of 87.3°. In this way, the tailings from the dam failure have the potential for the production of adobes, which are mainly used in fence walls. In addition, it can be stated that the adobes with Kraft lignin were cohesive and resistant to the impacts of water droplets on their surface, showing the binding and stabilizing effect of Kraft lignin in mining waste.

**Keywords:** Stabilizer. Erodibility. Hydrophobicity. Raw earth block.

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE.....</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO’’.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Solo como material de construção.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Adobe e suas propriedades.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Mineração e rejeito.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Produtos tecnológicos com Rejeito de mineração.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Lignina.....</b>	<b>18</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Lignina Kraft.....</b>	<b>21</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Tecnologias desenvolvidas com lignina Kraft.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.2.1</b>	<b>Aplicação em polímeros.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.2.2</b>	<b>Aplicação em hidrogéis.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.2.3</b>	<b>Aplicação em adesivos.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.2.4</b>	<b>Aplicação como ligante asfáltico.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.2.5</b>	<b>Aplicação em materiais compósitos.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2.6</b>	<b>Conclusões das aplicações da lignina Kraft.....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS.....</b>	<b>28</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>29</b>
	<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGO.....</b>	<b>36</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>38</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1</b>	<b>Rejeito de mineração.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2</b>	<b>Lignina Kraft.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3</b>	<b>Produção dos adobes.....</b>	<b>40</b>
<b>2.4</b>	<b>Ensaio mecânicos.....</b>	<b>42</b>
<b>2.5</b>	<b>Ensaio de absorção de água e capilaridade.....</b>	<b>43</b>



2.6	Ensaio de erodibilidade.....	44
2.7	Ensaio de ângulo de contato.....	45
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>45</b>
3.1	Rejeito de mineração.....	45
3.2	Lignina Kraft.....	46
3.3	Propriedades mecânicas.....	47
3.4	Propriedades Físicas.....	50
4	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

Em 05 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, no município de Mariana/MG. Dos 50 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de mineração de ferro contidos na barragem, 34 milhões foram lançados no rio, enquanto o restante foi sendo gradativamente carreado para jusante e em direção ao mar. O desastre atingiu 663,2 km de corpo d'água nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, além de impactos ao estuário do Rio Doce e à sua região costeira. Considerada a maior tragédia ambiental da história do Brasil, é possível citar os danos à flora, fauna, às atividades econômicas da região, alteração na qualidade da água, morte e desaparecimento de pessoas, restrições à pesca, entre outros. O *Lauda Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*, publicado um dia após o rompimento, aponta que “as medidas de reparação dos danos, tangíveis e intangíveis, quando viáveis, terão execução a médio e longo prazo, compreendendo neste caso pelo menos dez anos”. Alguns anos depois, em 2019, ocorreu o rompimento da barragem de Brumadinho-MG, novamente com prejuízos incalculáveis. Frente ao grande volume de material que ficou depositado nos leitos do rio, nas cidades mais atingidas pela lama, medidas de mitigação dos prejuízos são necessárias, como exemplo, o reaproveitamento desse rejeito para fins construtivos.

A cidade Mariana/MG possui diversas construções feitas com adobe e pau-a-pique, arquitetura típica do período colonial brasileiro. Foi apenas no início do século XX, que esse modelo foi substituído pelo tijolo cozido devido ao surgimento de uma nova tendência arquitetônica, uma vez que os primeiros trilhos da estrada de ferro em Mariana começaram a surgir, possibilitando a chegada de materiais construtivos não produzidos localmente. Por outro lado, por ser uma cidade com aproximadamente três séculos e tombada como Monumento Nacional, muitas dessas edificações de adobe e pau-a-pique precisam de restaurações e manutenção. Assim, se faz necessário o domínio, aperfeiçoamento e prática da técnica construtiva que utiliza o adobe.

Os adobes tradicionais são tijolos produzidos manualmente com molduras de madeira. Utiliza-se solo (com areia e argila), água e palha para promover sua estabilização dimensional. Depois, eles são secos ao sol por 2 a 3 semanas, sendo o processo de queima desnecessário (VEGA *et al.*, 2011). Os tijolos de adobe possuem vantagens em relação aos tijolos cerâmicos, como sua baixa condutibilidade térmica que, segundo Garzón (2002), é três vezes menor num

muro de tijolos crus que em um de tijolos cerâmicos furados. Além disso, o adobe tem a capacidade de absorver a umidade do ambiente quando ela se eleva subitamente e de devolvê-la nos momentos de queda da umidade (MINKE, 2005). Outra vantagem é a geração mínima de poluição com a produção e utilização do adobe, tornando fácil a sua reincorporação na natureza uma vez que sua matéria prima é natural (terra, água e partículas/fibras).

Nesse sentido, seria interessante a utilização desse grande volume de rejeito que ficou depositado ao longo das margens do Rio Doce, após o rompimento da barragem, para a produção de tijolos de adobe. No que se refere ao aspecto sustentável, o uso do rejeito como material de construção em uma escala maior diminuiria a demanda por outros materiais convencionais, como o cimento e o tijolo comum (submetido a queima), resultando em um menor consumo energético e menor degradação do meio ambiente (VEGA *et al.*, 2011). Outro ponto a se considerar, quando pensamos no material construtivo adobe em específico, é a economia com energia elétrica, devido a menor condutibilidade térmica desses materiais, evitando o uso de aquecedores e ar-condicionado ao longo de toda a vida útil da construção.

No entanto, o adobe tem grande afinidade com a água, sofrendo processos de rápida deterioração quando exposto diretamente às intempéries. Sendo assim, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos na busca de melhorias no desempenho dos adobes, principalmente, com a adição de estabilizantes físicos e/ou químicos. Millogo e colaboradores (2016) adicionaram esterco de vaca no adobe e constataram melhoria significativa na resistência à água. Correa e colaboradores (2015) adicionaram partículas de bambu e “baba de cupim sintética” em tijolos de adobe e identificaram uma redução na absorção de água e perda de massa, além de melhoria do desempenho mecânico dos tijolos. A lignina, a exemplo, avaliando seu papel na natureza, pode ser uma alternativa de estabilizante para os adobes.

A lignina é um polímero orgânico natural e renovável que pode ser facilmente obtido a partir de licores negros provenientes da produção da celulose Kraft, podendo ser usada como matéria-prima na fabricação de adesivos para madeira (Ang *et al.*, 2019), borracha de pneus, reforço em mangueiras industriais, além de termoplásticos em geral. Isso se deve ao fato de a lignina ser um aglutinante natural, uma macromolécula que confere rigidez e resistência à compressão nos materiais lignocelulósicos, além de melhorar a estabilidade dimensional dos mesmos, por ser hidrofóbica (SILVA, 2006). Por isso, espera-se que a lignina Kraft possa atuar na estabilização química de adobes, visando uma diminuição da absorção de água e um aumento da resistência mecânica nos tijolos de adobe.

Este estudo traz uma interessante abordagem em materiais construtivos, mais especificamente em relação aos adobes produzidos com material gerado a partir de rejeito de

mineração. Procurou-se ressaltar suas propriedades físicas, mecânicas e superficiais, visando elencar seus pontos fracos e fortes quando se faz a incorporação da lignina Kraft como estabilizante, em diversos teores. De acordo com os resultados obtidos, os adobes poderiam ser aplicados para alvenaria de vedação, interna e externa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Solo como material de construção

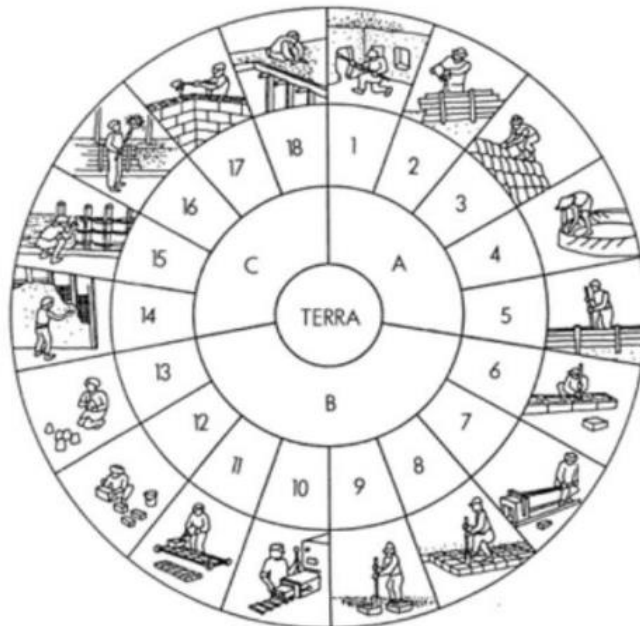
As habitações feitas de terra crua, ou seja, que não envolvem cozimento e são secas pelo sol ou pelo ar, datam de pelo menos cem séculos. Diversas civilizações nasceram e desapareceram sem que esse tipo de construção caísse em desuso (DETHIER *et al.*, 1982). Em locais como na Turquia, na Assíria e no Oriente Médio foram encontradas construções com terra apiloada ou moldada nos anos de 9000 a 5000 a.C. (MINKE, 2001).

Edificações de fortificações e residências no Egito eram feitas de adobe, assentados com uma fina camada de areia. Também se produzia lajes com uma argamassa de argila e areia juntamente com troncos roliços. Argila apiloada entre alvenarias duplas de pedra foram usadas para edificar as muralhas da China. Em Portugal, o uso de taipas é registrado pelos escritores desde o império romano, ressaltando sempre o uso da terra como o material mais importante. Na França, também foi encontrado um sistema construtivo conhecido como *terre pisé*, que seria a taipa de pilão e uma técnica utilizando solo e palha seca, conhecida por *torchis*, mais resistente a rachaduras devido à trama estabelecida com a palha. No Brasil, desde o início de sua colonização, todas as culturas componentes dominavam técnicas construtivas que usavam a terra como matéria prima. Os negros trazidos da África já conheciam o adobe e no Brasil colônia a taipa de pilão e a de mão eram as técnicas construtivas mais empregadas (PISANI, 2004).

A terra como elemento de construção apresenta vantagens como boas propriedades térmicas da edificação, absorção e liberação da umidade, geração mínima de resíduos e baixo consumo energético no seu manuseio e fácil reincorporação na natureza. Além das vantagens citadas, as construções com terra exercem um papel importante como patrimônio da humanidade e como material construtivo sustentável.

Ademais, existe uma divisão dos tipos de sistemas construtivos com terra, que abrangem três grupos principais, de acordo com Nito e Amorim (2015), (“A”, “B” e “C”, Figura 1). Tais tipos de sistemas construtivos abordados utilizam essa matéria prima de acordo com o estabelecido pelo Centro Internacional de Construções com Terra (CRATerre).

Figura 1 - Diagrama dos diferentes grupos de sistemas construtivos antigos e modernos que utilizam a terra como matéria-prima.



Fonte: Nito e Amorim (2015) adaptado de Guillard e Houben (1989).

No grupo “A” estão os sistemas construtivos em que não existe separação entre material e componente construtivo, ou seja, a transformação do solo e a edificação estão contidas em um mesmo processo, podendo ser executadas de várias formas.

Uma dessas formas é a terra escavada (1), em que eram feitas escavações até encontrar solo com boas características mecânicas, na horizontal ou na vertical, formando grutas; (usada desde a pré-história).

Outra forma é a terra plástica (2), em que se molda a terra para construir blocos, permitindo maior facilidade de moldagem e desmoldagem.

Tem-se também a terra empilhada ou cob (3), em que montículos de terra misturada com palha são sobrepostas por fiadas.

A terra modelada (4) é outra forma, em que o barro é moldado à mão, construindo em altura por faixas.

E por último a terra compactada (5), em que são usadas fôrmas chamadas taipais onde o material é compactado. Ele pode ser compactado manualmente, com um pilão de madeira ou, atualmente, com equipamentos pneumáticos.

No grupo “B”, estão os sistemas em alvenaria de vedações em terra, portantes ou não, utilizando blocos. São usados na sua construção diferentes tipos de unidades pré-fabricadas, que após a secagem, integram a construção.

Nos desenhos (6), (7), (8) e (9) do grupo “B” tem-se blocos apiloados prensados, cortados e em torrões, respectivamente, que podem ser simplesmente apiloados à mão, usando formas de madeira e um pilão ou recortados diretamente na terra. Atualmente eles são os chamados BTC (blocos de terra comprimida) confeccionados com auxílio de máquinas, técnica bastante significativa na nova construção com terra.

No desenho (10) do grupo “B” tem-se a terra extrudada, feita por extrusão, que permite blocos para alvenaria e placas pré-fabricadas que podem ser usadas como revestimento de paredes. Essa técnica deriva do modo de produção dos tijolos cerâmicos.

Já nos desenhos (11), (12) e (13) tem-se os adobes mecânicos, que são blocos de terra bastante argilosa e areia, manual e moldados sem compactação e secos ao sol, normalmente no local da obra.

O grupo “C” abrange os sistemas mistos, que associam uma estrutura suporte em que o uso da terra é um elemento secundário, enchendo ou revestindo outras estruturas, que podem ser de madeira ou de outros materiais de origem vegetal, como cana e bambu.

No desenho (14) do grupo “C”, tem-se a terra de recobrimento, que reveste estruturas de terra de variados tipos, como taipa e adobe.

Tem-se também o desenho (15), que representa a terra sobre engradado ou terra de guarnição, que inclui a taipa de mão e é produzida pela aplicação de terra sobre uma estrutura de madeira ou bambu.

Tais técnicas apresentadas mostram a variedade de formas de construções com terra, sendo relevante o fato de que elas podem ser combinadas entre si, a fim de melhor atender as circunstâncias exigidas do seu local de aplicação.

## **2.2 Adobe e suas propriedades**

O adobe é um tijolo maciço sem sinterização. Sua constituição básica é solo e água, desde que as propriedades físicas e mecânicas dessa composição, atendam aos critérios mínimos de segurança e habitabilidade de uma determinada edificação. O solo é a matriz, que tem como principais funções envolver, suportar e proteger os outros componentes que agem como reforço, mantendo os mesmos em uma determinada posição. Hoje em dia, os adobes são considerados materiais não convencionais e têm sido empregados na habitação, construções rurais e edifícios ecológicos modernos. Diante da crise energética mundial, quando se compara o consumo de energia entre a produção de adobes com blocos de concreto, tem-se 2.635 kJ e 30.595 kJ, respectivamente, o que equivale a um consumo doze vezes maior para o bloco de

concreto (Seminário Ibero-americano de arquitetura e construção com terra - SIACOT, 1976). Vantagens em comparação com os materiais industriais incluem baixo custo (descentralização da produção), conforto térmico e acústico, absorção e liberação da umidade, consumo mínimo de água e energia, redução de resíduos e fácil reincorporação na natureza.

As propriedades do Adobe dependem das características físicas, químicas e mineralógicas do solo, teor de água, procedimentos de produção, secagem e tipo de estabilização (CORRÊA *et al.*, 2012). O teor de água adequado para a produção de adobe é um importante parâmetro que é definido conforme a composição do mesmo. Além disso, a absorção de água e baixa resistência à compressão de adobes, são importantes questões que requerem investigação adicional. Outra questão importante é a presença de partículas ou fibras lignocelulósicas em adobes, que proporciona ductilidade, reduz a retração por secagem, preserva a forma de adobe e evita a expansão transversal (devido ao efeito Poisson). Um aumento do teor de fibra pode reduzir a resistência à compressão, mas pode aumentar a ductilidade, enquanto as partículas com uma alta relação de aspecto (comprimento / diâmetro) possibilitam uma melhoria no desempenho mecânico (ELDIN *et al.*, 2014).

No que diz respeito à estabilização de adobes, é possível fazê-la através da adição de diferentes produtos na terra, como emulsões betuminosas, cal, cimento Portland, fibras e outros. Estabilizar a terra significa adicionar materiais para obter qualidades permanentes para uma aplicação específica. No contexto de construções com terra, essa estabilização pode ser feita para melhorar, em alguns casos: a resistência mecânica; o desempenho quanto à ação da água, incluindo estabilidade volumétrica; trabalhabilidade e ductibilidade.

Cada tipo de material adicionado como estabilizante tem um mecanismo de ação diverso. Nesse sentido, emulsões betuminosas podem fechar poros e canais capilares, reduzindo a absorção e adsorção de água por parte dos grãos de solo. A cal melhora a trabalhabilidade e reage com a argila formando partículas insolúveis e inertes. O cimento Portland promove a criação de um esqueleto sólido que se opõe ao movimento dos grãos. As fibras criam uma armadura multidirecional capaz de reduzir os movimentos dos grãos de solo entre si, diminuindo a retração por secagem e melhorando a ductibilidade. Quando se corrige o solo, adicionando areia em um solo muito argiloso, por exemplo, essa areia adicionada também pode ter função estabilizante.

Nesse contexto, o esqueleto sólido do material terra é constituído de pedregulho e areia, sendo que a parte arenosa apresenta grande capacidade de mobilizar atrito interno se houver contato entre os grãos. Sendo assim, a areia é indispensável para dar a estrutura resistente aos esforços mecânicos das construções com terra. Já o silte, é a fração intermediária entre a areia

e a argila, sendo que muito silte é prejudicial para uso da terra na construção. E a argila é a porção de menor granulometria do solo, com partículas de formato lamelar, tendo como característica ser um ligante natural, com diferentes composições, a depender do tipo de argila. No entanto, é necessário conhecer o tipo de argila presente no solo, pois dependendo do tipo, ela pode ter uma grande capacidade de absorver água e provocar expansões.

Nesse ínterim, Correa *et al.* (2015) adicionaram ao adobe “baba de cupim sintética” (DS- 328®, produto comercial) que se comportou como um ligante no tijolo, reduzindo a absorção de água, a perda de massa na água e a retração linear. Tal característica torna o adobe mais resistente às intempéries, aumentando conseqüentemente sua durabilidade e estimulando seu uso também em locais de clima úmido. Com isso, o adobe se torna um material mais atraente para o uso geral, tanto pelas suas propriedades tecnológicas, quanto por toda sua bagagem cultural e sustentável. Reduz também exigências de construções com adobe (como beirais bem mais salientes), resolvendo diretamente o problema do contato com a água. Além disso, a “baba de cupim sintética”, juntamente com partículas de bambu (na quantidade de 6%) introduzidas no adobe, aumentaram a resistência a compressão em até 90%, devido a aglomeração das partículas promovida pela “baba de cupim sintética”, que melhorou o empacotamento das partículas do solo, diminuindo a capilaridade e formando uma microestrutura mais coesa.

Barbosa e Ghavami, em um trabalho publicado em 2014, no Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, em Portugal, estudaram a estabilização da terra crua com metacaulim para a produção de adobes. O metacaulim, que é um material amorfo, sofre ativação alcalina, desencadeando o processo de geopolimerização. Misturado à terra, o geopolímero funcionará como ligante, agregando as partículas do solo e conferindo maior estabilidade. Os geopolímeros convencionais são feitos de cinzas volantes e escória de alto forno (chamados de precursores) e, como ativadores, usa-se silicato de sódio, hidróxido de sódio e/ou hidróxido de potássio. O metacaulim é uma argila caulínica calcinada, que tem uma boa relação sílica/alumina, o que é bom pois para se formar geopolímeros são necessários materiais ricos nesses componentes. Nesse estudo, as misturas para o adobe foram feitas de solo, metacaulim, hidróxido de sódio, silicato de sódio e água. Percebeu-se que, para o caso de adobes, 3% de tal ligante já é suficiente para dar estabilidade com relação à água. Além disso, o ligante geopolimérico fez reduzir drasticamente a quantidade de água necessária para dar a consistência à terra para moldagem de adobe. Com o ligante polimérico, a terra exigiu apenas 10,4% de água e, sem ele, 18,5%, além da eliminação quase total da retração por secagem. A resistência a compressão, nos adobes estabilizados, foi superior a resistência dos adobes sem estabilização.



## 2.3 Mineração e rejeito

A mineração, desde o seu início com o “ciclo do ouro”, é uma atividade de extrema importância no setor econômico e financeiro do Brasil. Após a extração nas jazidas, é necessário usar a água para separar o minério de ferro do material que não tem valor comercial. É o jeito mais barato de fazer o beneficiamento (essa separação). Com isso, gera-se o rejeito, que é basicamente uma lama com substâncias sem valor comercial. De acordo com C. Li *et al.* (2010), para cada 1 tonelada de minério de ferro obtida, são geradas 1,5 toneladas de resíduo. Levando em conta que apenas em 2020, de acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (Ibram), teve-se uma comercialização de 1,009 bilhão de toneladas de minério de ferro, tem-se então um grande volume de resíduo que é produzido anualmente. Essa lama (que são os resíduos sólidos e água resultantes de processos de extração de minérios) é então armazenada em reservatórios, chamados de barragens.

Apesar dos rejeitos poderem ser armazenados em minas subterrâneas, cavas exauridas de minas, pilhas, empilhamento a seco, ou em pasta, a técnica preferida pelas empresas são as barragens de contenção, pois são feitas em estágios, de acordo com a necessidade da geração de resíduos, dissolvendo os custos da construção e operação. Entretanto, tal técnica representa um perigo iminente, com um alto potencial destrutivo do meio ambiente no caso de rompimento, como ocorreu com a Barragem do Fundão em Mariana (em 2015) e com a barragem do município de Brumadinho (em 2019).

No que se refere ao aspecto sustentável, o uso do rejeito como material de construção em uma escala maior diminuiria a demanda por outros materiais convencionais, como o cimento e o tijolo comum (submetido a queima), resultando em um menor consumo energético e menor degradação do meio ambiente. Tais argumentos se alinham com a proposta desse trabalho, que é a produção de adobes utilizando o rejeito de mineração, tornando o ganho ainda maior pelo seu aspecto sustentável intrínseco.

### 2.3.1 Produtos tecnológicos com Rejeito de mineração

Podemos encontrar na literatura alguns exemplos de materiais do ramo da construção civil produzidos com o rejeito de mineração da barragem do fundão. Salgado (2018) produziu blocos de concreto para pavimentação com rejeito de mineração e cinzas de bagaço de cana de açúcar, utilizando o tratamento controle com as proporções de 1:2, 98:3, 49:2, 21 (cimento:

areia: pó de pedra: brita). Ela avaliou a eficiência de substituição de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da areia pelo rejeito de mineração e o efeito da substituição de 1% de cimento por cinzas do bagaço de cana de açúcar. Os pavers foram confeccionados em uma máquina de vibro compressão e ficaram em processo de cura por 28 dias em temperatura ambiente. Depois, foram submetidos a ensaios de: densidade, absorção de água, resistência à compressão e microscopia eletrônica de varredura, antes e após o envelhecimento acelerado. Percebeu-se que a substituição total da areia por rejeito não afetou a resistência a compressão dos pavers, nem a densidade e nem a absorção de água dos compósitos. Tais resultados encontrados nesse estudo confirmam a hipótese de se substituir completamente a areia da mistura para a produção de pavers por rejeito de mineração, dando uma destinação adequada e agregando valor ao resíduo.

Vilela *et al.* (2020) também utilizou o rejeito de mineração para a confecção de materiais construtivos. Eles estudaram o tijolo solo-cimento com resíduo de mineração. O tijolo solo-cimento é composto por solo, cimento Portland e água e, diferente dos tijolos tradicionais, não há queima em seu processo produtivo. Nesse trabalho, os tijolos foram produzidos com substituição de diferentes porcentagens (0, 10, 20, 30 e 40%) de solo pelo resíduo de mineração. A mistura de solo utilizada foi classificada como A-4, e o cimento utilizado foi o CPV – ARI. A composição química e mineralógica do rejeito de mineração foi determinada no Laboratório Químico da Samarco, enquanto as propriedades físico-químicas dos resíduos foram avaliadas no Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Já a distribuição granulométrica foi analisada no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Universitário de Lavras (UNILAVRAS) seguindo a NBR 7181. Com essa caracterização, o material do resíduo foi classificado como muito fino.

O plano experimental utilizado foi a substituição de 0, 10, 20, 30 e 40% do solo por rejeito, sendo a porcentagem de cimento Portland na mistura (10%) de acordo com a classificação do solo, como A – 4. Determinou-se as propriedades de densidade aparente, absorção de água, perda de massa por imersão, resistência à compressão, condutividade térmica e a microestrutura, antes e após o envelhecimento acelerado. Concluiu-se que com o aumento do percentual de resíduos de mineração ocorreu a redução da absorção de água dos tijolos em função do aumento de sua densidade. Tijolos produzidos com 10% resíduo obtiveram a maior resistência média à compressão aos 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado; no entanto, porcentagens de 40% dos resíduos atendem aos padrões comerciais atuais, sendo a alternativa mais viável para agregar valor à destinação de resíduos sólidos de mineração.

## 2.4 Lignina

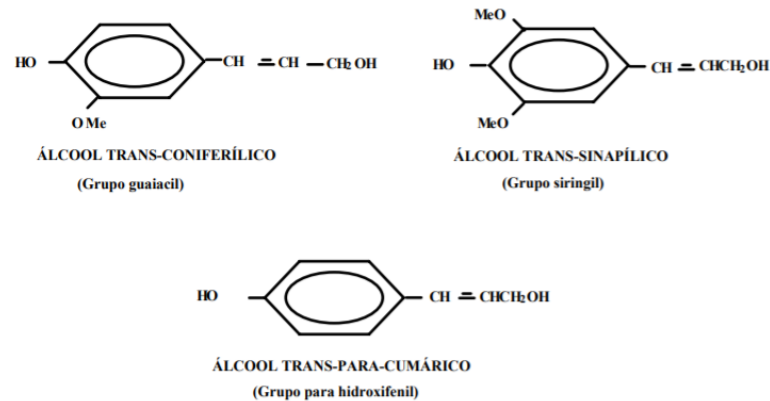
A lignina foi descoberta em 1838, depois que Anselme Payen tratou a madeira com ácido sulfúrico concentrado. Peter Klason, em 1897, após estudar a composição de lignosulfonatos, levantou a hipótese de que a lignina é quimicamente relacionada com o álcool coniferílico, propondo, em 1907, que a lignina era uma macromolécula e, depois, que as unidades de álcool coniferílico eram unidos por ligação éter (KLOCK *et al.*, 2005).

Cerca de 20 a 40% do peso da madeira é composto por lignina, que representa a parte não-carboidrato da madeira livre de extrativos, apresentando uma alta complexidade. Não é possível separá-la, em termos de quantidades, sem a degradação da estrutura da madeira. A lignina possui um sistema totalmente amorfo, ligado quimicamente as polioses, sendo um polímero aromático de sistema heterogêneo e ramificado sem nenhuma unidade repetidora. De acordo com o grupo ao qual o vegetal pertence (coníferas, folhosas ou gramíneas) a composição da estrutura básica da lignina é diferente. Sendo assim, é importante identificá-las com relação à espécie de origem e ao método de isolamento utilizado. Por exemplo, nota-se que as ligninas de madeira de fibras longas possuem mais uniformidade de espécie para espécie (KLOCK *et al.*, 2005).

Com relação às suas quantidades em cada parte do vegetal, nas coníferas, cerca de 70% da lignina em massa é encontrada na parede secundária, devido a sua espessura. No entanto, sua maior concentração está na lamela média, representado 90% de sua constituição. De maneira geral, na parede secundária das coníferas, há uma quantia entre 55% e 88% de lignina, sendo esse valor próximo ao valor encontrado para madeiras de folhosas. Após concluído o processo de lignificação no vegetal, geralmente ocorre a morte da célula formando o tecido de resistência e tem-se a lignina, representando um produto do metabolismo da planta.

A origem da lignina se dá após a polimerização dehidrogenativa, que é iniciada por enzimas, através de álcoois primários, que se originam na fotossíntese após diversas rotas metabólicas. Esses álcoois primários são: álcool trans-coniferílico, álcool trans-sinapílico e álcool para-trans-cumárico. O grupo coniferílico está mais presente nas espécies de coníferas, enquanto o grupo siringílico é mais comumente encontrado nas angiospermas dicotiledôneas. Para separar a lignina da sua associação natural com a parede celular é necessário romper ligações lignina-polissacarídeos ocorrendo conseqüentemente uma diminuição no peso molecular. Sendo assim, o termo lignina “in situ” se refere à lignina associada à parede celular da planta e quando se quer referir a lignina isolada, é necessário ter em mente que tal isolamento pode gerar mudanças químicas da lignina em extensões variadas.

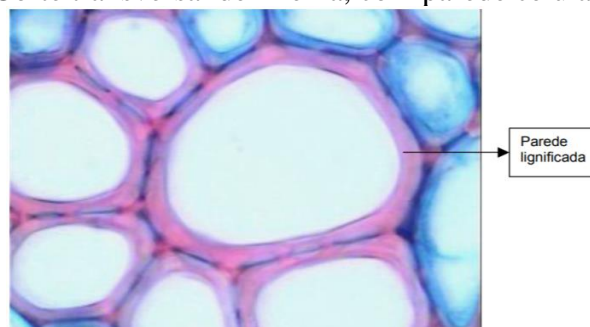
Figura 2 - Estruturas precursoras da lignina.



Fonte: Klock (2005).

Diferentemente da celulose, que se encontra em todas as plantas, a lignina só é formada em plantas vasculares, que possuem tecidos especializados em funções como transporte de soluções aquosas e suporte mecânico. Dessa forma, ela tem notável importância no transporte de água, nutrientes e metabólitos, além de fornecer suporte mecânico nos vegetais (pois oferece resistência e rigidez mecânica às células). Sua estrutura a torna hidrofóbica (reduz a permeabilidade da parede celular à água) e oferece proteção contra o ataque de organismos xilófagos (sendo essencialmente fenólica, a lignina age como um fungicida). A lignificação além de ser resultado do sistema de condução de água também permite que a árvore suporte sua copa a muitos metros de altura. Além disso e de sua capacidade como um agente selante, a lignificação também serve como mecanismo de descarga dos lixos metabólicos do vegetal. Fungos e algas, que são plantas primitivas, não possuem lignina, pois não necessitam da ação protetora e de suporte que é oferecida pela lignina (FENGEL; WEGNER, 1989).

Figura 3 - Corte transversal de xilema, com parede celular lignificada.

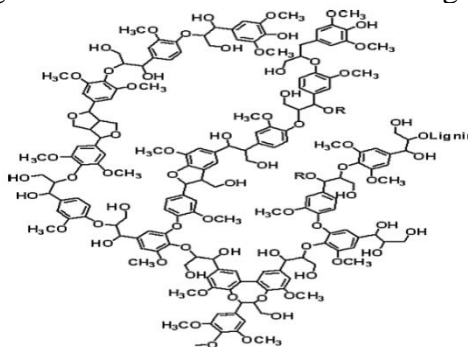


Fonte: Klock (2005).

As ligninas, constituintes da parede celular, são feitas de unidades fenil-propano unidas por ligações C-O-C e C-C, tendo ligado ao anel benzênico um número variável de grupos

hidroxílicos e metoxílicos (KLOCK et al., 2005). Na Figura 3 podemos ver a parede secundária de uma célula lignificada, que efetivamente bloqueia a água e também a entrada de nutrientes para dentro da célula, sendo este o motivo das células com paredes lignificadas estarem mortas na maturidade.

Figura 4 - Estrutura da molécula de lignina.



Fonte: Lignoworks (2017).

A molécula de lignina apresenta transição vítrea, que é a temperatura na qual um polímero amorfo começa a amolecer. Abaixo da temperatura o polímero apresenta as características de um vidro (rigidez, etc.). A temperatura de amolecimento deste composto situa-se entre 135 a 190°C.

A lignina tem diversas aplicações: os materiais lignocelulósicos que a apresentam em grande quantidade são considerados adequados para utilização energética, tanto pelo poder calorífico desta substância quanto pela sua estabilidade de degradação. Alguns destes produtos bioenergéticos são: queima direta, uso como briquetes, pellets, carvão vegetal, dentre outros. Este composto químico também é usado na indústria de curtimento de couro e corantes, pela indústria de adesivos naturais, dentre outras diversas.

Grande parte da lignina que se gera vem da indústria de celulose e papel, sendo ela o principal subproduto gerado. A lignina torna o papel escuro, sendo necessário extraí-la para seu branqueamento. Boa parte dessa lignina que é extraída é utilizada na queima para a produção de energia primária. Normalmente altos teores de lignina não são desejáveis na indústria de celulose e papel, devido ser elemento ligante da parede celular. Seus altos teores podem levar a maior dificuldade de polpação. Além disso, altos teores destas substâncias podem levar a coloração do papel, requerendo maior intensidade do processo de branqueamento da polpa celulósica (JÚNIOR, 2020).

### 2.4.1 Lignina Kraft

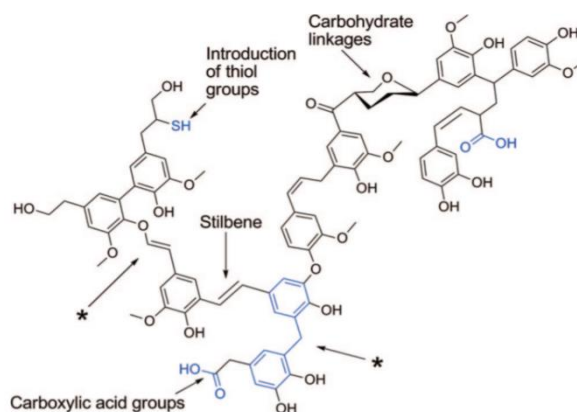
Todo processo químico de polpação tem o objetivo de remover o máximo de lignina e carboidratos (como a hemicelulose), para separar as fibras de celulose umas das outras, a fim de obter uma polpa adequada para a produção de papel e outros produtos (SANTOS, 2018).

A lignina proveniente do processo Kraft de produção de celulose é queimada, em sua maior parte, para a geração de energia elétrica. Porém, nesse processo é gerada uma elevada quantidade de lignina, muito além da necessária para produzir energia. Assim, tal composto era tratado como um resíduo industrial. Porém, frente ao seu grande potencial de utilização em diversos setores da tecnologia, atualmente é considerado um subproduto da indústria de papel e celulose. Um exemplo de aplicação da lignina Kraft é como blenda de lignina com matrizes poliméricas, desempenhando funcionalidades como: compatibilizante (GRAUPNER, 2008), plastificante (MOUSAVIUNET *et al.*, 2013), retardante de chamas (GUO *et al.*, 2013; RÉTI *et al.*, 2013), agente antimicrobiano (RICHTER *et al.*, 2015) e estabilizante térmico para polímeros (GADIOLI *et al.*, 2016).

Cerca de noventa por cento da produção mundial de celulose é feita através do processo de polpação Kraft, em que os cavacos de madeira são colocados em uma mistura, chamada de licor branco, composta de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio ( $Na_2S$ ), por 2 horas a 170°C. A celulose é então removida para ser branqueada depois, ficando apenas a lignina e a hemicelulose (e outros carboidratos) dissolvidas no licor, que recebe o nome, nessa fase, de licor negro (SANTOS *et al.*, 2014).

De acordo com Lora (2008), no cozimento da madeira ocorre a quebra de ligações entre a lignina e os carboidratos da parede celular, a despolimerização da lignina e sua reação com íons hidrosulfeto e sua recondensação. A despolimerização se dá pela quebra das ligações  $\alpha$  e  $\beta$  éter, primeiro com os grupos fenólicos depois com os não fenólicos. A formação de outras estruturas como estireno, catecol, estilbeno e bifenila ocorrem após esse processo (Figura 5) (BARAPATRE *et al.*, 2016; LORA, 2008).

Figura 5 - Modelo que descreve os recursos estruturais característicos da lignina Kraft de pinho.



Fonte: Zakzeski (2010)

Tais reações resultam grupos fenólicos livres, solúveis no meio alcalino, que modificam a estrutura da lignina e enriquecem sua atividade antioxidante. No processo, as ligações C-C se mantêm devido a serem ligações mais estáveis. Em pH neutro, a lignina Kraft é hidrofóbica com 1 a 2% de enxofre (em % atômico) na forma de grupos tiol alifático. Alguns outros grupos funcionais importantes estão na estrutura, como grupos metoxila, carboxílico, hidroxilas alifática e aromática (CHUNG; WASHBURN, 2015; DOHERTY *et al.*, 2011). Para adicionar a lignina Kraft na mistura de solo (rejeito de mineração), é interessante sua hidrofobicidade em pH neutro, uma vez que se constatou para o rejeito um pH no valor de 7,2.

Finalizado o cozimento, o licor negro fica com uma composição química de aproximadamente 2/3 de material orgânico do processo, sendo 35 a 45% da massa lignina. O restante é material inorgânico (THELIANDER, 2009). Para alimentar o tanque de descarga do digestor, utiliza-se parte desse licor negro, porém diluído (que é o licor negro fraco) e o restante vai para a etapa de recuperação. Essa etapa visa recuperar os compostos inorgânicos na forma de licor branco, com o mínimo de perdas, para reutilização no digestor gerando energia elétrica e vapor superaquecido para o processo, diminuindo seus custos.

Posteriormente, através da acidificação do licor negro, a lignina Kraft é isolada por precipitação, já que as moléculas ionizadas são diminuídas a partir da protonação dos grupos fenólicos e se autoaglomeram. Como após o cozimento o pH é maior que 12 e os outros componentes do licor negro são solúveis em água em pH maior que 10, a redução do pH precipita a lignina com baixo teor de cinzas e de carboidratos (HADDAD *et al.*, 2017; LORA, 2008). A lignina técnica, que corresponde a 2% em massa do total produzido, é a quantidade que é comercializada, sendo que a maior parte produzida é queimada para produzir energia elétrica.

## 2.4.2 Tecnologias desenvolvidas com lignina Kraft

Com o tempo, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos utilizando a lignina Kraft para a produção de produtos em vários setores da tecnologia. Alguns deles têm se tornado bastante relevantes devido às propriedades atingidas com a adição da lignina Kraft. Algumas aplicações são possíveis utilizando diretamente a lignina, sem nenhuma modificação química, entretanto, em outras, é necessária sua ativação para conseguir reagir com as respectivas matrizes. Essa reatividade da lignina Kraft pode estar diretamente relacionada ao fato desta possuir grupos hidroxila com diferentes graus de reatividade. A OH primária alifática é a mais reativa, seguida da OH secundária alifática e, por fim, a OH aromática, que praticamente não tem reatividade (CATETO *et al.*, 2011; GOUVEIA *et al.*, 2018). Também pode ocorrer, durante a formação da estrutura tridimensional, uma inacessibilidade nas hidroxilas aromáticas fazendo com que elas não reajam, que é chamado de impedimento estérico. Uma das opções para vencer essa não reatividade é reagi-la com óxido de propileno (reação que recebe o nome de oxipropilação), que faz com que a estrutura final da lignina contenha apenas grupos OH alifáticos (GÓMEZ-FERNÁNDEZ *et al.*, 2017; GOUVEIA *et al.*, 2018; KÜHNEL *et al.*, 2017).

Dentre os estudos desenvolvidos utilizando a lignina Kraft podemos citar alguns exemplos: sua aplicação em polímeros, fabricação de hidrogéis, produção de adesivos para painéis, uso como ligante asfáltico, uso em compósitos, entre outros.

### 2.4.2.1 Aplicação em polímeros

Diversos estudos sugerem o uso da lignina como poliol para a preparação de polímeros poliuretanos como alternativa de fonte renovável, pois a macromolécula da lignina pode fornecer grupos OH, que reagem com diisocianatos produzindo poliuretanos (CARRIÇO *et al.*, 2016; MAHMOOD *et al.*, 2016; TAVARES *et al.*, 2016; PONNUSAMY *et al.*, 2018). Os poliuretanos têm grande importância na indústria pois possuem propriedades versáteis e são possíveis de serem fabricados através de polióis de variadas fontes (SANTOS, 2018). Tavares *et al.* (2016) produziram PU a partir de óleo de mamona modificada e lignina Kraft não modificada. Perceberam com os resultados que a adição de lignina aumentou a densidade de reticulação do material através do aumento do nível de hidroxilas, presentes na lignina e, conseqüentemente, aumentou a temperatura de transição vítrea do material e suas propriedades mecânicas.



### 2.4.2.2 Aplicação em hidrogéis

Há um grande interesse em se produzir hidrogéis a partir de polímeros naturais, pois estes possuem características relevantes para os hidrogéis, como: biodegradabilidade, biocompatibilidade, susceptibilidade à degradação enzimática, baixa toxicidade e outros. Os hidrogéis têm uma ampla gama de aplicações em diversos setores da tecnologia. Eles são polímeros reticulados hidrofílicos que conseguem absorver e manter a água ou outros fluidos dentro da sua estrutura sem se dissolver em água. Variados biopolímeros (como lignina, celulose, amido, proteínas) têm sido copolimerizados ou usados como blenda com outros polímeros sintéticos para produzir compósitos que são usados para confecção de hidrogéis (SALAM *et al.*, 2010, 2011; STEVENS *et al.*, 2010).

Um estudo interessante, feito por El-Zawawy (2005), utilizou a lignina para manufatura de hidrogéis com alto teor de intumescimento. A sintetização foi realizada pela copolimerização entre a acrilamida, poli (acetato de vinila) e ligninas Kraft ou Soda. Perceberam que o hidrogel sintetizado a partir da lignina Soda apresentou maior taxa de intumescimento, menor absorção de água e menor taxa de desentumescimento comparado ao hidrogel com lignina Kraft. Atribuiu-se tais características à maior compatibilidade da estrutura da lignina Soda com água.

### 2.4.2.3 Aplicação em adesivos

As resinas fenólicas sintéticas são largamente produzidas em todo o mundo para a produção de adesivos para a indústria madeira, sendo usados da confecção de painéis, laminados decorativos e outros produtos de madeira projetada (Imam *et al.*, 2013). As resinas fenólicas utilizadas na síntese desses painéis são derivadas de fontes de petróleo (fenol –P-) e gás natural (formaldeído –F-). A substituição do P por fontes como a lignina promete ganhos ambientais e econômicos (GHAFFAR *et al.*, 2014). A produção de adesivos à base de ligninas tem sido bem explorada nas últimas décadas e, embora as ligninas de fibra longa sejam mais adequadas para a formulação de resinas fenólicas devido ao seu baixo teor de impurezas e alta reatividade, espécies de madeira como o *Eucalyptus spp.* constituem a principal fonte de fibra para a indústria de celulose e papel na América do Sul (BROWN *et al.*, 2000; YANG *et al.*, 2016). Um fator que deve ser levado em conta para a utilização da lignina em diferentes aplicações é a sua ativação através da modificação química, que melhora seu desempenho,

sendo a hidroximetilação o método mais comum usado para condições alcalinas (MALUTAN *et al.*, 2017; MARTON *et al.*, 1996; VAZQUEZ *et al.*, 1999; ZHAO *et al.*, 1994;).

Taverna *et al.* (2017) estudaram a síntese e caracterização de resinas fenol-formaldeído modificados com 10, 20 e 30% em peso de lignina Kraft. Em todos os casos a lignina Kraft foi ativada por hidroximetilação em meio alcalino a temperatura de 50°C. Foram produzidas três resinas comerciais utilizadas na produção de laminados de alta pressão (HPL) em laboratório. Os laminados de alta pressão são formados por lâminas de papel Kraft impregnadas em resinas fenólicas. Foram determinadas as propriedades mecânicas e térmicas dos laminados: com ensaios de tração, flexão, impacto e interlaminar, além de análises termogravimétricas e análise mecânica dinâmica. Também estudaram o envelhecimento dos materiais na água. A incorporação de ligninas diminuiu ligeiramente a estabilidade térmica e a densidade de reticulação. As melhores propriedades viscoelásticas foram alcançadas para os materiais prensados a 150 ° C e 70 kg / cm<sup>2</sup> no sentido longitudinal dos papéis. As propriedades mecânicas dos laminados, que estão relacionadas à estrutura da resina curada (características da lignina, teor de lignina, grau de cura), tipo, orientação e número de papéis e interações entre papéis e resinas, foram semelhantes às dos materiais tradicionais com substituição de até 20% em peso da lignina Kraft. Uma ligeira melhora do desempenho mecânico foi observada para laminados com 30% em peso de substituição de P, indicando um efeito sinérgico entre papel, resina e lignina. Os laminados modificados exibiram melhor resistência à água devido à hidrofobicidade da lignina.

Ferdosian *et al.* (2017) fizeram uma revisão das pesquisas recentes publicadas sobre adesivos de base biológica para aplicação em compósitos de madeira, como a lignina, amido e proteínas vegetais. Eles pesquisaram os adesivos de fenol formaldeído à base de lignina e também aqueles à base de lignina sem formaldeído. O formaldeído foi categorizado como um material cancerígeno e tóxico com DL50 de 65 mg / kg, pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) em 2008 (Dongre *et al.*, 2015). Diversos estudos foram realizados buscando substituir parcialmente resina de fenol-formaldeído e resina de uréia-formaldeído pela lignina. No entanto, apenas alguns foram encontrados com a síntese de adesivos à base de lignina sem formaldeído.

Geng *et al.* (2006) desenvolveram um adesivo para madeira sem formaldeído usando lignina Kraft e polietilenimina (PEI) para a fabricação de compensados. A amostra contendo lignina / PEI com uma razão em peso de 2: 1 apresentou as maiores resistências ao cisalhamento (incluindo resistência ao cisalhamento a seco, resistência à imersão e secagem em água, teste de água fervente / resistência seca e teste de água fervente / resistência úmida) e a maior

resistência à água. A condição ótima de cura para este bioadesivo em uma prensa a quente foi de 9 min a 140 °C. Verificou-se que o tempo de pré-mistura (> 40 min) e o peso molecular (Mw) de PEI variando de 70.000 a 150.000 não apresentaram efeitos relevantes na resistência ao cisalhamento do compensado.

Em outro trabalho, adesivo de lignina Kraft desmetilada (DKL) e polietilenimina (PEI) foi examinada por lap-shear test (LIU *et al.*, 2006). Os estudos de FTIR das características de cura mostraram que os grupos fenólicos da lignina foram primeiro oxidados para gerar quinonas e depois reagiram com PEI. A influência do tempo de pré-mistura (10-120 min), condições de cura (tempo de prensa de 3-7 min, temperatura de prensa de 100-160 °C), teor de sólidos (14-25% em peso), peso DKL / PEI proporção (1: 4 a 4: 1) e o peso molecular de PEI (10.000-750.000) na resistência ao cisalhamento dos adesivos formulados também foram investigados. Verificou-se que o tempo de pré-mistura e o peso molecular do PEI tiveram efeitos insignificantes na resistência ao cisalhamento. A maior resistência ao cisalhamento foi obtida quando o adesivo foi formulado com 1: 1 DKL / PEI e curado a 120 °C por 5 min.

#### **2.4.2.4 Aplicação como ligante asfáltico**

Outro estudo utilizando a lignina Kraft foi realizado por Santos *et al.* (2018), que adicionaram lignina Kraft em teores de 3%, 6% e 9% no ligante asfáltico convencional CAP 50/70 para avaliar suas propriedades reológicas, antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO). Do ponto de vista macromolecular, a lignina possui estrutura parecida com os componentes do CAP (SOBREIRO, 2014), o que é de muita importância, pois se deve ter compatibilidade dos demais polímeros com o ligante para obter melhores desempenhos. Após realizados os ensaios, notou-se que os ligantes asfálticos modificados por adição de lignina se apresentaram mais resistentes à variação de temperatura, à deformação permanente e, principalmente, ao envelhecimento, indicando o comportamento desse material como antioxidante. Principalmente para o teor de 9%, ainda que os outros teores também apresentaram melhorias do desempenho se comparados com o ligante puro. Comprovou-se então que o uso da lignina Kraft é viável do ponto de vista da reologia do material e do ponto de vista ambiental, ao ser associada ao ligante convencional.

#### **2.4.2.5 Aplicação em materiais compósitos**

Alwadani *et al.* (2021) estudaram as *Características de superfície e interface de derivados hidrofóbicos de lignina em solventes e filmes*. Neste estudo, a lignina foi modificada por metilação e enxerto com éter dodecil glicidílico (DGE), e filmes contendo esses derivados de lignina foram gerados seguindo diferentes rotas e utilizando solventes (água, hidróxido de amônio e dimetilformamida). O impacto do tipo de solvente, método de revestimento e temperatura nas características dos filmes preparados foi estudado por meio de análises de ângulo de contato (experimento de gota séssil), microscopia eletrônica de varredura e índice de estabilidade Turbiscan (TSI). A metilação e o enxerto de DGE subsequente melhoraram a hidrofobicidade da lignina, bloqueando o sítio ativo fenólico da lignina, o que melhorou a tensão superficial, o ângulo de contato e a tensão interfacial de solventes contendo derivados de lignina. Essas alternâncias na hidrofobicidade da lignina diminuíram substancialmente a absorção de água (90%) dos derivados de lignina analisados pela análise de molhabilidade do teste de pó. A análise da microbalança de cristal de quartzo (QCM) revelou que as modificações foram bem-sucedidas na redução da dissolução de derivados de lignina em água e exibiram o comportamento fundamental de absorção da água pelos filmes. O derivado de lignina enxertado com DGE e metilado com a maior hidrofobicidade pode ser mais atraente do que outros derivados de lignina para serem usados potencialmente em aplicações de revestimento e embalagem.

#### **2.4.2.6 Conclusões das aplicações da lignina Kraft**

Assim, após o levantamento dos diversos estudos a respeito da lignina Kraft, foi possível perceber suas propriedades de hidrofobicidade, em diversos tipos de aplicações. Tais estudos corroboram com a hipótese central do trabalho, que é adicionar a lignina Kraft na pasta de adobe, a fim de diminuir sua afinidade com a água e contribuir para a reologia da mistura. No entanto, percebeu-se também que, a depender do tipo de aplicação para a lignina Kraft e a matriz na qual ela será inserida, pode ser necessária alguma modificação química com o propósito de torná-la reativa com o material que se quer trabalhar.

### 3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Frente ao que foi exposto, é possível reconhecer vastos benefícios em se construir com terra, tanto vantagens técnicas (ótimo isolante térmico e acústico), como econômicas (produção com material local, natural e renovável) e culturais, uma vez que a cidade de Mariana, a exemplo, tem uma demanda de restauração de construções históricas em adobe. Além desses aspectos mencionados, existe a necessidade de mitigação dos danos do rompimento da barragem, através da realocação do rejeito que ficou depositado às margens do rio.

A lignina Kraft, que resulta do processo de polpação Kraft da indústria de papel e celulose, através de estudos recentes, tem apresentado uma gama de possibilidades de aplicações, entre elas a capacidade de tornar um material mais hidrofóbico. Levando em conta a hidroflicidade dos adobes e a necessidade de aplicação e aprimoramento dessa técnica, sua estabilização com lignina Kraft torna-se plausível e merecedora de estudos mais aprofundados.

Assim, a produção de adobes ecológicos com rejeito de mineração e lignina Kraft se torna atraente tanto pela perspectiva social, cultural e ambiental, quanto pelo aspecto econômico e técnico.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G., C., P. de. **Caracterização Física e Classificação dos Solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes, 2004.
- ALWADANI, N.; GHAVIDEL, N.; FATEHI, P. **Surface and interface characteristics of hydrophobic lignin derivatives in solvents and films**, v. 609, p. 125-656, 2021.
- ANG, A. F. *et. al.* Lignin-based copolymer adhesives for composite wood panels A review. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 95, p. 102-408, 2019.
- ASSAL, Marianna Boghosian Al. **Revista Cadernos de Pesquisa da Escola da Cidade**. São Paulo: Editora da Cidade, p. 11-18, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16814**: Adobe – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.
- BABÉ, C. *et. al.* Thermomechanical characterization and durability of adobes reinforced with millet waste fibers (sorghum bicolor). **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, e00422,
- BARBOSA, Normando Perazzo; GHAVAMI, Khosrow. Construção em terra e sustentabilidade. In: **Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis**, 2014. Univ. do Minho, Guimarães, Portugal, 5-7 de mar de 2014.
- BARAPATRE, A. *et. al.* In vitro evaluation of antioxidant and cytotoxic activities of lignin fractions extracted from *Acacia nilotica*. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 86, p. 443–453, 2016.
- BERTELSEN, I. M. G. *et al.* Influence of synthetic waste fibres on drying shrinkage cracking and mechanical properties of adobe materials. **Construction and Building Materials**, v. 286, 122738, 2021.
- BROWN, C., BALL, J.: World View of Plantation Grown Wood, **Oceania**, 2000, 2, p. 0.01.
- BLACKBURN, S.; LAWSON, T. A. Mullite-alumina composites by extrusion. **Journal of the American Ceramic Society** 75 (4), p.953-57, 1992.
- CALVO-FLORES, F. G. *et. al.* Lignin and Lignans as Renewable Raw Materials: **Chemistry, Technology and Applications**. Ed. Wiley, 2015.
- CARRIÇO, C. S.; FRAGA, T.; PASA, V. M. D. Production and characterization of polyurethane foams from a simple mixture of castor oil, crude glycerol and untreated lignin as bio-based polyols. **European Polymer Journal**, v. 85, p. 53–61, 2016.
- CASTRILLO, M. C. de; IOANNOU, I.; PHILOKYPROU, M. Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust. **Construction and Building Materials**, v. 294, 123516, 2021.

CASTRO, N.; PACHECO, C. **Análise das possibilidades de expansão do uso do gás natural na indústria cerâmica brasileira**. Rio de Janeiro: IE - UFRJ, (BGN, nº2), 2005.

CATETO, C. A. *et. al.* Kinetic study of the formation of lignin-based polyurethanes in bulk. **Reactive and Functional Polymers**, v. 71, n. 8, p. 863–869, 2011.

CHAGAS I. **Barragem de rejeitos e os casos Mariana e Brumadinho**, 2019. Disponível em: <https://www.politize.com.br/barragem-de-rejeitos>. Acesso em: 13 fev. 2021.

CHAIB, H.; KRIKER, A.; MEKHERMECHE, A. Mekehermeche, Thermal study of earth bricks reinforced by date palm fibers, **Energy Procedia**, v. 74, p. 919–925, 2015.

CHUNG, H.; WASHBURN, N. R. **Extraction and Types of Lignin**. Ed. Elsevier Inc., 2015.

CUI, C. *et. al.* Toward thermoplastic lignin polymers; Part II: Thermal & polymer characteristics of kraft lignin & derivatives. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 864–886, 2013.

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

CORRÊA A. A. R.; MENDES L. M.; TONOLI G. H. D. Caracterização de solo de Lavras-MG para produção de adobe. In: **TerraBrasil-IV Congresso de arquitetura e construção com terra no Brasil**. Fortaleza Ceará; 2012.

DETHIER, J; POMPIDOU, C. G. **Arquitetura de Terra ou o futuro de uma tradição milenar**. Rio de Janeiro: Avenir, 1982.

DOHERTY, W. O. S.; MOUSAVIOUN, P.; FELLOWS, C. M. Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 2, p. 259–276, 2011.

DONGRE, P. *et. al.* Lignin-furfural based adhesives. **Energies**, v. 8, p. 7897–7914, 2015.

EL-ZAWAWY, W. K. Preparation of hydrogel from green polymer. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 16, n. 1, p. 48–54, 2005.

ELDIN H. K. S. *et. al.* Mechanical properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete. **Int J Eng Innovative Technol**; 4(4):4–10, 2014.

FENGEL, D; GERD, W. **Wood chemistry, ultrastructure and reactions**. 1 ed. Berlin; New York: Walter de Gruyter, p. 613. 1989.

GADIOLI, R.; WALDMAN, W. R.; PAOLI, M. A. Lignin as a green primary antioxidant for polypropylene. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 45, p. 1–7, 2016.

GANDINI, A.; BELGACEM, M. N. Lignins as components of macromolecular materials. In: **Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources**, n. i, p. 243–271, 2008.

GARZÓN, B.S. De la construcción tradicional a la racionalización de componentes en caña y tierra-cemento. In: **Seminário Ibero-Americano de Construção com Terra**. Anais. Salvador, Ba, Proterra/Cyted (2002).

- GENG, X.; LI, K. Investigation of wood adhesives from kraft lignin and polyethylenimine. **J. Adhes. Sci. Technol**, v. 20, p. 847–858, 2006.
- GHAFFAR, S.H., FAN, M. Lignin in straw and its applications as an adhesive. **Int. J. Adhes. Adhes.** 2014, 48, 92–101.
- GLEISSLE, W; GRAZYK J. Extrusion in ceramics. **Engineering Materials and Processes**, F. Händle (ed.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2009.
- GÓMEZ-FERNÁNDEZ, S. *et. al.* Properties of flexible polyurethane foams containing isocyanate functionalized kraft lignin. **Industrial Crops and Products**, v. 100, p. 51–64, 2017.
- GOUVEIA, J. R. *et. al.* Synthesis of lignin-based polyurethanes: a mini-review. **Mini-Reviews in Organic Chemistry**, v. 15, p. 1–8, 2018.
- GRAUPNER, N. Application of lignin as natural adhesion promoter in cotton fibrereinforced poly (lactic acid) (PLA) composites. **Journal of Materials Science**, v. 43, n. 15, p. 5222–5229, 2008.
- GUO, C.; ZHOU, L.; LV, J. Effects of expandable graphite and modified ammonium polyphosphate on the flame-retardant and mechanical properties of wood flourpolypropylene composites. **Polymers and Polymer Composites**, v. 21, n. 7, p. 449–456, 2013.
- HADDAD, M. *et. al.* A feasibility study of a novel electro-membrane based process to acidify Kraft black liquor and extract lignin. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 106, p. 68–75, 2017.
- HOSSAIN, K.M.A.; MOL L. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes, **Constr. Build. Mater**, v. 25, p. 3495–3501, 2011.
- IMAM, S. H. *et. al.* Biobased adhesives, gums, emulsions, and binders: current trends and future prospects. **J. Adhes. Sci. Tech.** 27(18–19), 1972–1997, 2013.
- JÚNIOR, J. B. G. Notas de aula da disciplina **Seleção de materiais lignocelulósicos**, do programa de pós-graduação em Engenharia de Biomateriais, da Universidade Federal de Lavras. Segundo semestre de 2020.
- KAFODYA, I., OKONTA F., KLOUKINAS P., Role of fiber inclusion in adobe masonry construction, **Journal of Building Engineering** 26, 100904, <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100904>, 2019.
- KLOCK, U. *et. al.* **Química da madeira**. 3 ed., revisada. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005.
- KÜHNEL, I.; SAAKE, B.; LEHNEN, R. Oxyalkylation of lignin with propylene carbonate: Influence of reaction parameters on the ensuing bio-based polyols. **Industrial Crops and Products**, v. 101, p. 75–83, 2017.



LAURICHESSE, S.; AVÉROUS, L. Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers. **Progress in Polymer Science**, v. 39, n. 7, p. 1266–1290, 2014.

LI, C. *et al.*, Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings Part 2: The residues after iron recovery from iron ore tailings to prepare cementitious material, **J. Hazard. Mater**, v. 174, p.78–83, 2010.

LIU, Y.; LI, K. Preparation and Characterization of Demethylated Lignin-Polyethylenimine Adhesives. **J. Adhes**, v. 82, p. 593–605, 2006.

LORA, J. H. Industrial commercial lignins: Sources, properties and applications. In: **Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources**, p. 225–241, 2008.

MAHMOOD, N. *et al.* Depolymerization of lignins and their applications for the preparation of polyols and rigid polyurethane foams: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 317-329, 2016.

MALUTAN, T., NICU, R., POPA, V. I.: Contribution to the study of hydroxymetylation reaction of alkali lignina, **BioResources**, v. 3(1), p. 13–20, 2007.

MANSOURI, N. E. E.L.; SALVADÓ, J. Analytical methods for determining functional groups in various technical lignins. **Industrial Crops and Products**, v. 26, n. 2, p. 116– 124, 2007.

MARTON, J., MARTON, T., FALKEHAG, S.I.: Alkali-catalyzed reactions of formaldehyde with lignins in advances in chemistry. **ACS Publications**, Washington, DC, 1966.

MATTOSO, L. H. C. *et al.* Utilização de fibras vegetais para reforço de plásticos. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, São Carlos, n. 3, p. 1-4, nov. 1996.

MILLOGO, Y. *et al.* Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with *Hibiscus cannabinus* fibers. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 71-78, 2014.

MILLOGO, Y. *et al.* Earth blocks stabilized by cow-dung. **Materials and Structures**. DOI 10.1617/s11527-016-0808-6, 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.

MINKE, G. **Earth Construction Hanbook**. Southampton, England: Wit Press, 2005.

MOUSAVIOUN, P.; HALLEY, P. J.; DOHERTY, W. O. S. Thermophysical properties and rheology of PHB/lignin blends. **Industrial Crops and Products**, v. 50, p. 270–275, 2013.

MUÑOZ, P.; *et al.* Assessment of technological performances of extruded earth block by adding bottom biomass ashes. **Journal of Building Engineering**, v. 39, 102278, 2021.

MUÑOZ, P. *et al.* Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 254, 119314, 2020.

- NITO, M. K. S.; AMORIM, A. M. M. C. Sistemas construtivos em terra crua: panorama da América Latina nos últimos 30 anos e suas referências técnicas históricas. **Revista Cadernos de Pesquisa da Escola da Cidade**, n. 1, 2015, São Paulo.
- NOVICHIKHIN, A.V.; SHOROKHOVA A.V. Systematic processing of iron-ore waste in mining regions, **Steel Transl**, v. 47 (7), p. 456–462, 2017.
- OUEDRAOGO M, DAO K *et. al.* Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw. **Journal of Building Engineering**, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.005>, 2019.
- PISANI, M. A. J. Taipas: a arquitetura de terra. **Sinergia**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 09-15, jan/jun. 2004.
- PONNUSAMY, V. K. *et. al.* A review on lignin structure, pretreatments, fermentation reactions and biorefinery potential. **Bioresource Technology**, v. 271, p. 462-472, 2018.
- REED, J. S. *et al.* Mechanics of Extrusion, Science of Whitewares, Published by the **American Ceramic Society**, p. 157-168, USA, 1996.
- RICHTER, A. P. *et. al.* An environmentally benign antimicrobial nanoparticle based on a silver-infused lignin core. **Nature Nanotechnology**, v. 10, n. 9, p. 817–823, 2015.
- SALAM, A. *et. al.* Synthesis and characterization of starch citrate-chitosan foam with superior water and saline absorbance properties. **Biomacromolecules**, v. 11, n. 6, p. 1453–1459, 2010.
- SALGADO, L. M. **Blocos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de mineração e cinzas de bagaço de cana de açúcar**. 88p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- SANTOS, L. T. **Efeito estabilizante da lignina kraft em PBAT durante envelhecimento térmico e hidrotérmico**. 2018. 132p. Tese (Doutorado em Nanociências e Materiais Avançados) – Fundação Universidade Federal do ABC, Santo André, 2018.
- SANTOS, P. S. B. *et. al.* Characterisation of Kraft lignin separated by gradient acid precipitation. **Industrial Crops and Products**, v. 55, p. 149–154, 2014.
- SANTOS, N. S.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70, **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.
- SEKHAR, D.C.; NAYAK, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks, **Constr. Build. Mater**, v. 166, p. 531–536, 2018.
- SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA, 13., 1976, New York. O consumo de energia para a construção civil. New York: Grupos de Pesquisa da Universidade de Illinois, e Richard G. Stein e Assoc, Arquitetos, 1976.

SILVA, V. L. **Caracterização de ligninas de Eucalyptus spp. pela técnica de pirólise associada à cromatografia gasosa e à espectrometria de massas**. 85 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

SOBREIRO, F. P. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS**, Tese de D.Sc., São Carlos, 2014.

SOUZA, V. P. *et al.* Análise dos gases poluentes liberados durante a queima de cerâmica vermelha incorporada com lodo de estação de tratamento de água. **Revista Cerâmica** 54, p. 351-355, 2008.

STEVENS, E. S.; KLAMCZYNSKI, A.; GLENN, G. M. Starch-lignin foams. **Express Polymer Letters**, v. 4, n. 5, p. 311–320, 2010.

THELIANDER, H. Recovery of cooking chemicals: The treatment and burning of black liquor. In: **Pulping Chemistry and Technology**. p. 297–333, 2009.

TAVARES, L. B. *et al.* Bio-based polyurethane prepared from Kraft lignin and modified castor oil. **Express Polymer Letters**, v. 10, n. 11, p. 927–940, 2016.

TAVERNA, M. E. *et al.* Effect of Kraft Lignin from Hardwood on Viscoelastic, Thermal, Mechanical and Aging Performance of High Pressure Laminates. **Waste Biomass Valor**, v. 10, p. 585-597, 2017.

TEJADO, A. *et al.* Physico-chemical characterization of lignins from different sources for use in phenolformaldehyde resin synthesis. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 8, p. 1655–1663, 2007.

TOLEDO FILHO, R. D.; ENGLAND, G. L.; GHAVAMI, K. Comportamento e compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais: relação tensão de formação experimental e processo de fratura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 79-88, 1997.

TURRI, D. F. G. **Estudo Exploratório De Bloco Estabilizado Conformado Por Extrusão**. Dissertação, mestrado em Engenharia civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

VAZQUEZ, G. *et al.* ANTORRENA, G.: Acetosolv pine lignin as copolymer in resins for manufacture of exterior grade plywoods. **Bioresour. technol.** 70(2), 209–214 (1999).

VEGA, P. *et al.* Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain. **Construction and Building Materials**, v.25, p. 3020-3023, 2011.

VILELA, Alan *et al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste, **Construction and Building Materials**, v. 262, 120883, 2020.

VILLAMIZAR, M.C.N. *et al.* Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks, *Constr. Build. Mater.* v. 36, p. 276–286, 2012.

XP P13-901. **Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: Définitions - Spécifications – Méthodes d’essais – Conditions de réception**, 2001.

YANG, S., YUAN, T; SUN, R. Application of Technical Lignin in Wood Adhesive. In: **Inamuddin (ed.) Green Polymer Composites Technology: Properties and Applications**, pp. 127–148. CRC Press, Boca Raton, 2016.

ZAKZESKI, J. *et al.* The Catalytic Valorization of Ligning for the Production of Renewable Chemicals. *Chem. Rev.*, v. 110, p. 3552–3599, 2010.

ZAK, Philip *et al.* The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. *Construction and Building Materials*, 106, 179–188, 2016.

ZHANG, Q. *et al.* Morphological variation of lignin biomacromolecules during acid-pretreatment and biorefinery-based fractionation. *Industrial Crops and Products*, v. 77, p. 527–534, 2015.

ZHAO, L.W. *et al.* Utilization of softwood kraft lignin as adhesive for the manufacture of reconstituted wood. *J. Wood. Chem. Technol*, v. 14(1), p. 127–145, 1994.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGO**

**TIJOLOS DE ADOBE PROVENIENTES DE RESÍDUO DE MINERAÇÃO E  
ESTABILIZADOS COM LIGNINA KRAFT PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO**

## RESUMO

Uma das bases da economia brasileira é a mineração, que gera no processo milhões de toneladas de rejeito anualmente. Esse rejeito é depositado em barragens de contenção, se tornando um risco em potencial. No ano de 2015, na cidade de Mariana-MG, ocorreu o que ficaria conhecido como o maior desastre ambiental da história do Brasil, que foi o rompimento da barragem do Fundão. Depois, no ano de 2019, outra barragem de rejeitos rompeu, dessa vez em Brumadinho-MG. Assim, estudos que visem uma destinação mais adequada ao rejeito de mineração são de grande importância. O objetivo do trabalho foi avaliar o uso do rejeito na produção de adobes e sua estabilização com lignina Kraft (LK), que é um polímero orgânico natural, renovável e hidrofóbico. Foram confeccionados adobes com 0%, 0,5%, 1%, 2%, 4% e 8% de LK na matriz, com relação a massa seca do rejeito. Após moldados, os adobes ficaram em ambiente protegido das intempéries até a completa secagem. Para as propriedades mecânicas, os adobes com 2% de LK se destacaram com um módulo de ruptura de 0,64 MPa e um módulo de elasticidade de 75,5 MPa. O tratamento sem lignina obteve maior resistência a compressão, sendo essa de 1,20 MPa, seguido do adobe com 2% de LK, com resistência a compressão de 1 MPa. Para a propriedade de absorção de água, no geral todos os adobes com LK obtiveram melhores resultados que o tratamento controle, com destaque para os adobes com 2%, 4% e 8% de LK, com valores de 3,8 % de absorção de água. Para o ensaio de perda de massa (erodibilidade), os adobes com 4% de LK tiveram a menor perda: 0,23 g. No teste de ângulo de contato, os adobes com 4% de LK foram os mais hidrofóbicos, apresentando ângulo de 87,3 °. Dessa forma, o rejeito proveniente do rompimento da barragem apresenta potencial para a produção de adobes, os quais a principal aplicação é em paredes de vedação. Além disso, pode-se afirmar que os adobes com lignina Kraft ficaram coesos e resistentes aos impactos da gotícula de água em sua superfície, evidenciando o efeito aglutinante e estabilizante da lignina Kraft no rejeito de mineração.

**Palavras-chave:** Estabilizante. Erodibilidade. Hidrofobicidade. Bloco de terra crua.

## 1 INTRODUÇÃO

Em 05 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, no município de Mariana/MG. Considerada a maior tragédia ambiental da história do Brasil, o desastre atingiu 663,2 km de corpo d'água nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, além de impactos ao estuário do Rio Doce e à sua região costeira, conforme descrito no documento *Lauda Técnico Preliminar - Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais*, publicado em 26 de novembro de 2015. Frente ao grande volume de material que ficou depositado nos leitos do rio, medidas de mitigação dos prejuízos são necessárias, como exemplo o reaproveitamento desse rejeito para fins construtivos. A cidade de Mariana/MG, tombada como Monumento Nacional, que data de aproximadamente três séculos, possui diversas construções feitas com adobe e pau-a-pique, arquitetura típica do período colonial brasileiro. No entanto, um grande número dessas edificações de adobe e pau-a-pique precisam de restaurações e manutenção, se fazendo necessária a prática, aperfeiçoamento e domínio da técnica construtiva que utiliza o adobe.

O adobe é um tijolo maciço sem sinterização, em que sua constituição básica é solo e água. O solo é a matriz, responsável por envolver, suportar e proteger os outros componentes que agem como reforço, mantendo os mesmos em uma determinada posição. A terra como elemento de construção apresenta vantagens como boas propriedades térmicas da edificação, absorção e liberação da umidade, geração mínima de resíduos, baixo consumo energético no seu manuseio e fácil reincorporação na natureza (MINKE, 2001). Além das vantagens citadas, as construções com terra exercem um papel importante como patrimônio da humanidade e como material construtivo sustentável (CARVALHO; LOPES, 2012).

Nesse sentido, seria interessante a utilização desse grande volume de rejeito que ficou depositado ao longo das margens do Rio Doce após o rompimento da barragem para a produção de tijolos de adobe. No entanto, o adobe tem grande afinidade com a água, sofrendo processos de rápida deterioração quando exposto diretamente às intempéries (PEREIRA, 2019). Dessa forma, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos na busca de melhorias no desempenho dos adobes, principalmente, com a adição de estabilizantes físicos e/ou químicos (DORMOHAMADI; RAHIMNIA, 2020; MORSY *et al.*, 2022; MUÑOZ *et al.*, 2020).

Babe *et al.* (2021) analisaram o efeito das fibras de Azadirachta indica (neem) nas propriedades mecânicas, térmicas e de durabilidade de tijolos de adobe, constatando melhoria na resistência a compressão, melhor resistência a água e menor condutibilidade térmica. Correa *et al.* (2015) adicionaram partículas de bambu e “baba de cupim sintética” em tijolos de adobe

e identificaram uma redução na absorção de água e perda de massa, além de melhoria do desempenho mecânico dos tijolos. A lignina, a exemplo, avaliando seu papel na natureza (Klock, 2005), poderia ser uma alternativa de estabilizante para os adobes.

A lignina é um polímero orgânico natural e renovável que pode ser facilmente obtido a partir de licores negros provenientes da produção da celulose Kraft, podendo ser usada como matéria-prima na fabricação de adesivos para madeira (ANG *et al.*, 2019), ligante asfáltico (SANTOS *et al.*, 2018), materiais compósitos (ALWADANI *et al.*, 2021), além de termoplásticos em geral. Isso se deve ao fato de a lignina ser um aglutinante natural, uma macromolécula que confere rigidez e resistência à compressão nos materiais lignocelulósicos, além de melhorar a estabilidade dimensional dos mesmos, por ser hidrofóbica (SILVA, 2006). Por isso, espera-se que a lignina Kraft possa atuar na estabilização físico-química de adobes produzidos com rejeito de mineração proveniente do desastre de Mariana-MG, visando melhorar as propriedades físicas, ou seja, na diminuição da afinidade dos adobes com a água e sua susceptibilidade a erosão hídrica ocasionada em geral pela exposição dos adobes às gotículas de chuva.

Ainda há escassez de informação quanto a possibilidade de produção de adobes com rejeito de mineração e quanto ao uso de lignina Kraft como agente estabilizante.

Este estudo traz uma interessante abordagem em materiais construtivos, mais especificamente em relação aos adobes produzidos com material gerado a partir de rejeito de mineração. Procurou-se ressaltar suas propriedades físicas, mecânicas e superficiais, visando elencar seus pontos fracos e fortes quando se faz a incorporação da lignina Kraft como estabilizante, em diversos teores. Os ensaios realizados visam verificar o potencial dos adobes para aplicação em alvenaria de vedação, interna e externa.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Rejeito de mineração**

O rejeito de mineração proveniente do rompimento da Barragem do Fundão (ocorrido em 2015) foi coletado na cidade de Mariana, Minas Gerais, Brasil. A caracterização do rejeito foi realizada, seguindo as metodologias contidas na tabela 1.



Tabela 1 - Análises e metodologias na caracterização do rejeito.

<b>Análise</b>	<b>Norma/método</b>
Peso específico do rejeito	(LEAMER 1941 apud EMBRAPA, 1997)
Composição granulométrica	(ABNT, 2016)
Classificação do solo/rejeito	(EMBRAPA, 1997)
Limite de consistência do rejeito	(ABNT, 1984a; ABNT, 1984b; CAPUTO, 1998)
Umidade ótima	(ABNT, 1986)

Fonte: Da autora (2023).

## 2.2 Lignina Kraft

A lignina Kraft de *Eucalyptus* spp. proveniente de processo industrial, apresenta aspecto de um pó fino e coloração marrom. Ela foi caracterizada através da determinação de sua densidade aparente e sua granulometria.

Sua densidade aparente foi determinada em laboratório, pesando-se uma proveta de 50 ml de lignina Kraft e posteriormente pesando a mesma proveta cheia com água. Através da fórmula 1 (fórmula da densidade) foi possível constatar a densidade aparente da lignina Kraft.

$$d = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Para a determinação da granulometria da lignina Kraft, foi pesada uma quantidade de 100 g de lignina Kraft e utilizado um conjunto de 5 peneiras, com as respectivas aberturas: 0,6 mm; 0,3 mm; 0,15 mm, 0,075 mm e 0,053 mm.

## 2.3 Produção dos adobes

Foram produzidos adobes com diferentes percentuais de lignina Kraft, totalizando 6 tratamentos, conforme indicado na Tabela 2. O teor de lignina a ser adicionado foi medido com base no peso do rejeito. Para cada tratamento, foram moldados 15 corpos de prova com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm, em moldes de madeira. Esse tamanho de molde tem sido comumente usado na fabricação em escala laboratorial de adobes (BUI, 2021; HUSSAIN *et al.*, 2022; SEIFI *et al.*, 2018).

Tabela 2 - Plano experimental.

<b>Tratamento</b>	<b>% Lignina Kraft</b>	<b>Nº de corpos de prova</b>
T_R*	0	15
TL**_0,5%	0,5	15
TL_1,0%	1,0	15
TL_2,0%	2,0	15
TL_4,0%	4,0	15
TL_8,0%	8,0	15

\*T\_R = Tratamento referência; \*\*TL = Tratamento com lignina

Fonte: Da autora (2023).

A umidade utilizada a princípio foi encontrada através dos limites de consistência do solo. Segundo estudos anteriores encontrados na literatura, a umidade ideal para a moldagem deve estar dentro do limite plástico do solo, uma vez que valores mais altos aumentariam o risco de rachaduras na superfície devido ao estresse de encolhimento da secagem. Assim, o teor de umidade adotado foi entre os limites líquidos e plásticos do solo. Ouedraogo *et al.* (2019), calcularam a quantidade de água (em %) adicionada no adobe a partir da fórmula 2.

$$w (\%) = (w_L + w_P)/2 \quad (2)$$

O valor calculado é a média dos limites de liquidez ( $w_L$ ) e plasticidade ( $w_P$ ) de Atterberg.

A umidade ideal encontrada para a fabricação dos compósitos através da fórmula (2) foi de 20%. Após essa definição, o rejeito foi classificado em peneira com abertura de 3,67 mm e diâmetro de 550 mm, para homogeneização do material e retirada de impurezas. Após peneirar e destorroar o rejeito, este foi colocado em um recipiente com capacidade de 30 litros juntamente com a lignina Kraft, de acordo com as quantidades calculadas pelo plano experimental. Após a mistura dos componentes secos, adicionou-se 10% de água no começo para o amassamento manual da pasta. Conforme sua consistência foi modificando, o restante da água foi adicionado até obter uma pasta ideal para a moldagem. Por fim, essa pasta ficou armazenada em sacos herméticos em repouso por 24 horas, para preenchimento dos poros e “amolecimento” da mistura (diretriz da NBR 16814, ABNT 2020).

Os moldes utilizados foram feitos de madeira e parafusados, em dinâmica de “abrir e fechar”, produzindo adobes de dimensões 40 mm x 40 mm x 160 mm, de forma a desmoldar com o mínimo de deformação possível. Depois de desmoldados, os adobes foram secos ao ar,

em local protegido das intempéries, até secar completamente. O esquema de produção dos adobes está apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Produção dos compostos de adobe e rejeito de mineração.

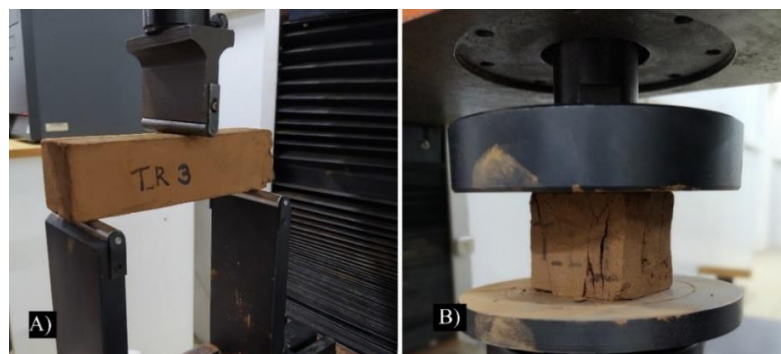


Fonte: Da autora (2023)

## 2.4 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos de resistência à compressão e resistência a flexão foram realizados em uma máquina de testes universal da marca AROTEC. Para o teste de resistência à compressão os corpos de prova foram cortados, seguindo os parâmetros da norma NTE.080 (NORMAS TÉCNICAS DE EDIFICACIÓN, 2000), já no teste de resistência à flexão estática nos adobes, foi utilizada uma célula de carga de 2 kN, com 3 cutelos e vão inferior de 140 mm, seguindo os mesmos procedimentos descritos por Araya-Letelier (2020). Os testes das propriedades mecânicas se encontram na Figura 2.

Figura 2 - Representação dos testes de resistência à flexão estática (a) e compressão (b).



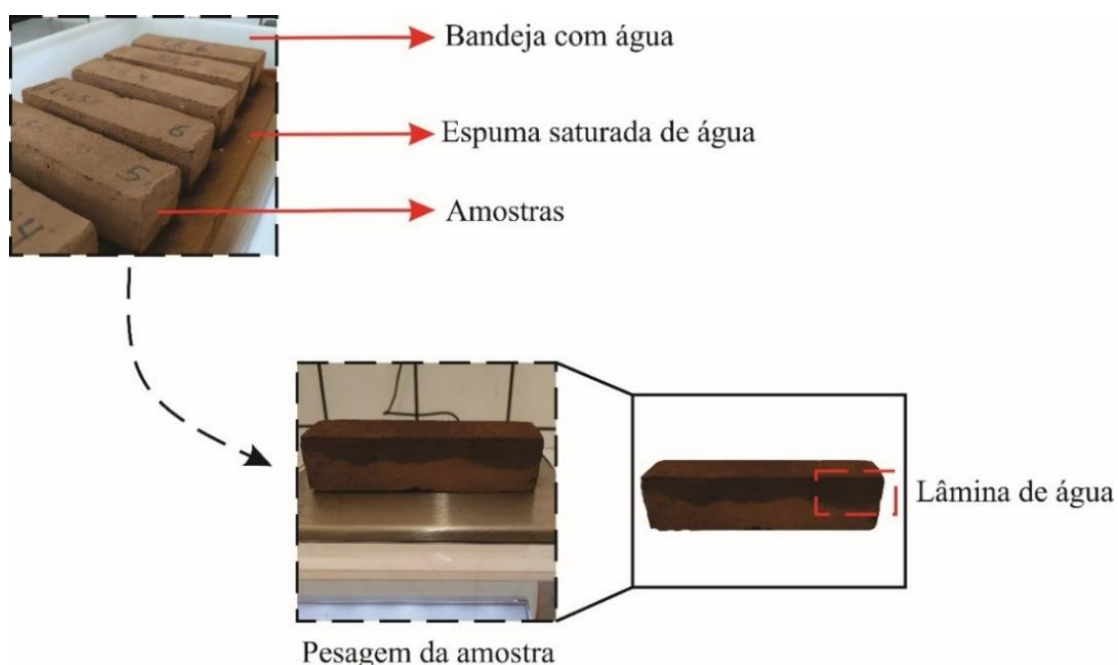
Fonte: Da autora (2023)

## 2.5 Ensaio de absorção de água e capilaridade

Para a avaliação da absorção de água e capilaridade seguiu-se adaptação da norma ASTM C 1585-1 (ASTM, 2020), que se refere ao *Teste de Absorção de Água (sortividade) de Concreto*. Para determinação das densidades aparentes, a massa seca (g) das amostras foi dividida pelo volume ( $\text{cm}^3$ ), em que o volume foi estimado a partir de 3 medidas das dimensões do compósito em todas as três direções através de paquímetro digital. Os valores médios de densidade aparente (DA) foram determinados seguindo-se a norma NBR 16184 (ABNT, 2021).

No ensaio de absorção de água e capilaridade, foram utilizados corpos de prova com medidas de 40x40x160 mm. Os adobes foram previamente secos até massa constante em estufa ventilada a 70 °C e depois foram resfriados em dessecador para atingirem a temperatura ambiente. Então foram pesados e uma das faces foi exposta indiretamente à água, com auxílio de espumas saturadas de água, mantidas em recipientes preenchidos com água. Em intervalos de tempo de 1, 5, 10, 20, 30 e 60 min., os adobes eram pesados e era medida a altura da lâmina de água de cada um (capilaridade), de acordo com a Figura 3.

Figura 3 - Foto esquemática do ensaio de AA e de capilaridade.



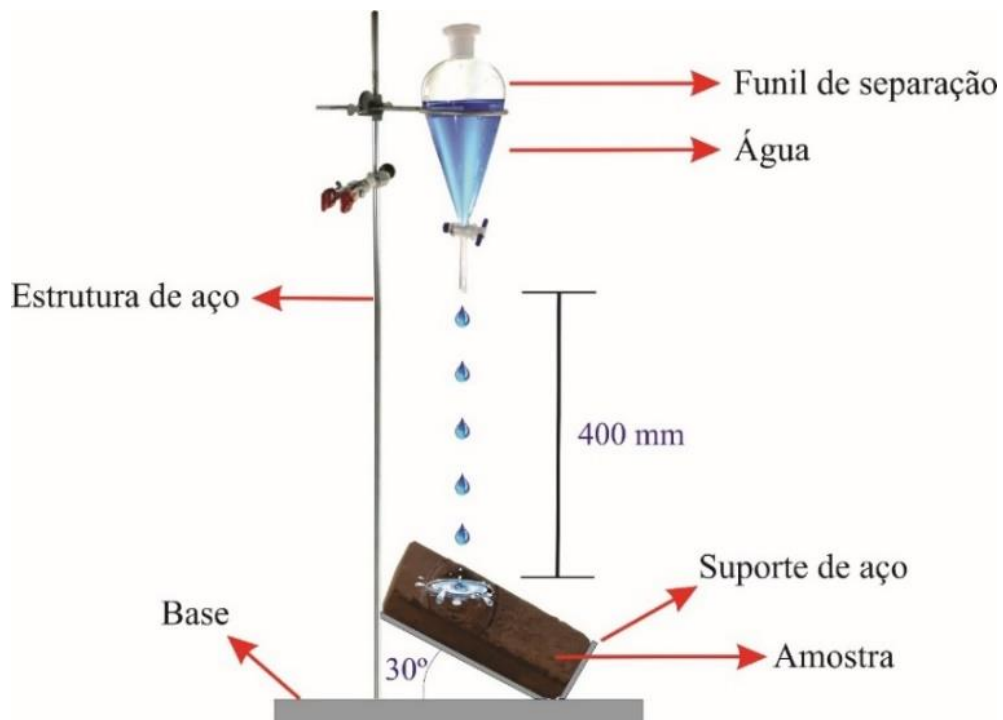
Fonte: Da autora (2023)

## 2.6 Ensaio de erodibilidade

O ensaio de erodibilidade, que verifica a resistência à erosão hídrica de cada corpo de prova, foi realizado seguindo o padrão NZS 4298 (1998). Esse padrão se baseia no método Geelong, representado na Figura 4, onde gotas de chuva são simuladas para avaliar a resistência à erosão hídrica de materiais à base de terra, como o adobe. Foram utilizados 3 corpos de prova por tratamento para o ensaio.

No início, os corpos de prova foram colocados em uma mesa inclinada a 30° e foi colocado um reservatório a uma distância de 400 mm no topo da amostra, gotejando 100 ml de água durante aproximadamente 30 minutos para cada corpo de prova de adobe. Os corpos de prova, antes do ensaio, foram secos em estufa até a estabilização de sua massa e pesados. Após o ensaio, os corpos de prova foram analisados visualmente quanto a formação de orifícios e foram secos e pesados novamente para verificação da sua perda de massa ao final do ensaio.

Figura 4 - Esquema do ensaio de erodibilidade.



Fonte: Da autora (2023)

## 2.7 Ensaio de ângulo de contato

O ângulo de contato foi avaliado utilizando um goniômetro Kruss Drop Shape Analyzer – DSA30 (Hamburgo, Alemanha), conforme a norma Tappi T458 cm-14 (TAPPI 2014). Uma gota de água deionizada foi aplicada sobre a superfície da amostra. A imagem da gota de água foi obtida por meio de uma câmera de vídeo e o ângulo de contato entre a gota e a superfície da amostra foi mensurada, conforme mostrado na Figura 5. Os testes foram realizados à temperatura ambiente (25°C). Cinco medições foram realizadas na superfície de cada amostra, o ângulo de contato foi mensurado no primeiro segundo após o gotejamento.

Figura 5 - Imagem do ensaio de ângulo de contato.



Fonte: Da autora (2023)

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Rejeito de mineração

A composição granulométrica da terra é um parâmetro importante na produção de adobes, pois, níveis insuficientes de areia, por exemplo, fazem com que não haja estrutura resistente nos tijolos. Obter os limites de Atterberg e o índice de plasticidade do rejeito é relevante pois vão indicar, de acordo com a metodologia descrita na Tabela 1, o percentual de umidade ideal a ser adotada nos adobes. Essa “umidade ideal” evita que o adobe fique com pouca água, dificultando sua moldagem e evita o excesso de umidade, que pode ocasionar diminuição de resistência mecânica. A composição química, o pH, a composição granulométrica, bem como o peso específico, os limites de Atterberg e o índice de plasticidade do rejeito encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição físico-química do rejeito.

<b>Composição química</b>	<b>Quantidade</b>
Fe (%)	16,322
SiO <sub>2</sub> (%)	24,150
P (%)	0,026
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4,332
<b>Granulometria</b>	
Argila (%)	20
Silte (%)	50
Areia (%)	30
<b>Propriedades</b>	
pH	7,2
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	3080
<b>Limites de Atterberg</b>	
Limite de liquidez (%)	22
Limite de plasticidade (%)	18
Índice de Plasticidade (%)	4

Fonte: Da autora (2023).

Dentre as três categorias de classificação de solos, de acordo com sua capacidade de retenção de água, o rejeito foi classificado como solo do tipo 2 (EMBRAPA, 1997), ou seja, de textura média, estando entre solo arenoso e argiloso. Um solo adequado para a produção de adobe, de acordo com a NBR 16814 (ABNT, 2020), é aquele que possui de 45% a 65% de areia, até 30% de silte e 24% a 35% de argila. A distribuição granulométrica do solo é importante, pois a areia é indispensável para dar a estrutura resistente aos esforços mecânicos das construções com terra, e a argila desempenha a função de ser um ligante natural, devido às suas partículas de formato lamelar. O rejeito utilizado no presente estudo apresentou elevado nível de silte e um nível de areia relativamente baixo se comparar seus percentuais com a NBR 16814 (ABNT, 2020).

### 3.2 Lignina Kraft

A densidade encontrada para a lignina Kraft foi de  $0,505 \pm 0,008$  g/cm<sup>3</sup>, o que está de acordo com estudos anteriores sobre lignina Kraft. Vaz, Junior e Barbosa (2022) encontraram para lignina Kraft uma densidade aparente de 0,492 g/cm<sup>3</sup>.

As quantidades de lignina Kraft e os respectivos tamanhos de grãos se encontram na tabela 4.

Tabela 4 - Tamanho dos grãos de lignina Kraft.

Tamanho dos grãos (mm)	Quantidade de lignina Kraft (%)
>0,6	1
0,6-0,3	12
0,3-0,15	19
0,15-0,075	9,5
<b>0,075-0,053</b>	<b>42</b>
<0,053	15

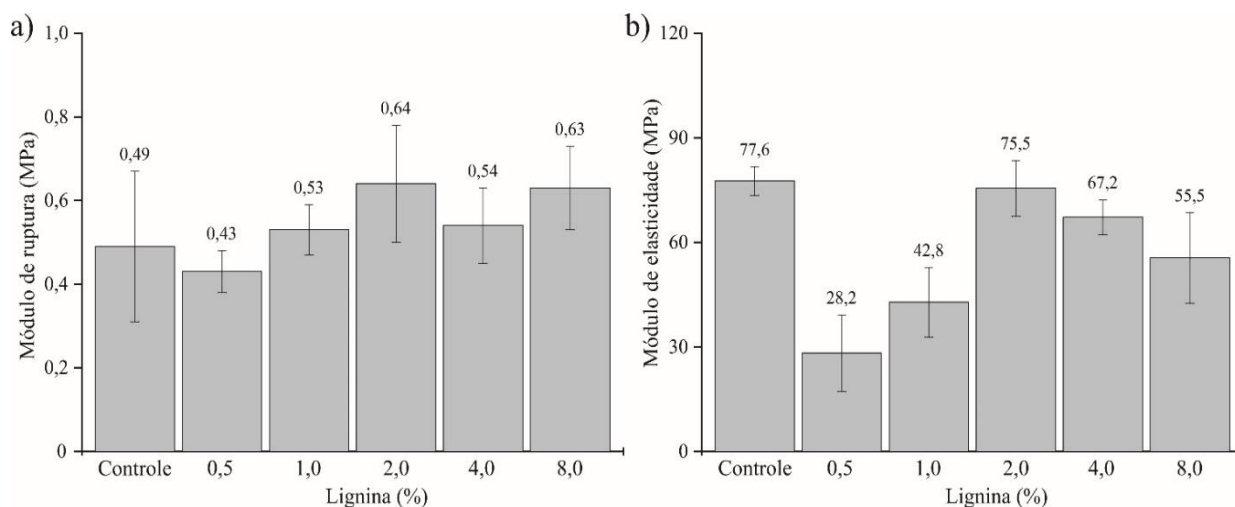
Fonte: Da autora (2023).

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, a maior porcentagem de lignina Kraft se encontra entre 0,053 e 0,075 mm. Essa granulometria se enquadra na granulometria de silte, que é entre 0,06 e 0,002 mm de acordo com a classificação das partículas pela NBR 6502 (ABNT, 1995).

### 3.3 Propriedades mecânicas

A adição de diferentes teores de lignina nos adobes proporcionou aumento no módulo de ruptura (MOR), no entanto, a rigidez ou módulo de elasticidade dos adobes diminuíram com a adição de lignina. É importante salientar que o comportamento não foi linear, sendo os adobes com 2% de lignina Kraft os que apresentaram melhor MOR sem alterar os valores de MOE em comparação ao controle (Figura 6).

Figura 6 - Módulo de ruptura e módulo de elasticidade dos adobes.



Fonte: Da autora (2023).



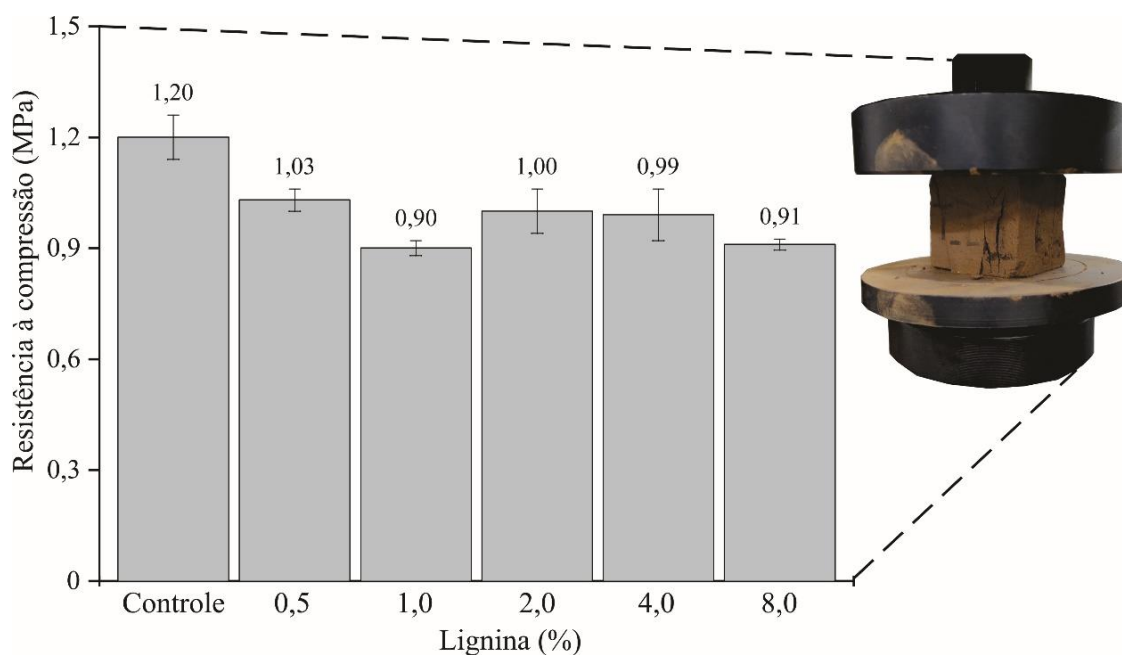
Na Figura 6 é evidente o desempenho dos adobes com 2% de lignina que apresentaram aumento de 30,6% no MOR em comparação com o Controle. Provavelmente esses resultados ocorreram em função da lignina ser um aglutinante natural, uma macromolécula que confere rigidez e resistência à compressão nos materiais lignocelulósicos (SILVA, 2006), aumentando assim o módulo de ruptura (MOR). Em comparação com as normatizações, os valores de todos os tratamentos para o módulo de ruptura se encontraram acima de 0,25 MPa, que é a resistência à flexão estática mínima exigida pela norma da Nova Zelândia, NZS 4298 (1998).

No módulo de elasticidade (MOE) ocorreu uma diminuição dessa propriedade nos adobes com adição de lignina Kraft. Os adobes com 2% de adição de lignina apresentaram MOE semelhante ao controle, ou seja, com exceção dos adobes com 2% de lignina, os demais adobes com lignina se mostraram menos rígidos do que o adobe controle. Como a rigidez representa o quanto um material é resistente à deformação, pode-se dizer que os adobes com lignina foram menos resistentes à deformação. Uma possível causa para essa menor resistência à deformação dos adobes com lignina, seria o fato de a lignina ser um polímero e, por isso, ela é inerentemente mais flexível, tornando então o compósito menos rígido.

Outro aspecto importante que também pode ter atuado na perda e variação da rigidez é o fato de a lignina ocupar os espaços vazios no adobe, dessa forma a concentração de 2% parece ter sido a concentração ótima, diminuindo os espaços vazios e conseqüentemente aumentando o MOR, de maneira a impactar na manutenção do MOE. As argilas e provavelmente a lignina atuam como ligantes na matriz, sendo a rigidez conferida pela areia, ou seja, a adição de lignina diminui ainda mais os teores de areia contidos no rejeito e, conseqüentemente, a rigidez dos adobes.

No ensaio de resistência a compressão, o efeito da adição de lignina foi semelhante ao observado no MOE, em função de sua granulometria e caráter polimérico, o que impacta na diminuição do teor de areia como um todo na matriz e conseqüentemente, na resistência a compressão dos Adobes (Figura 7), uma vez que a areia é responsável por dar a estrutura resistente aos esforços mecânicos.

Figura 7 - Resistência a compressão dos adobes com diferentes teores de lignina.



Fonte: Da autora (2023).

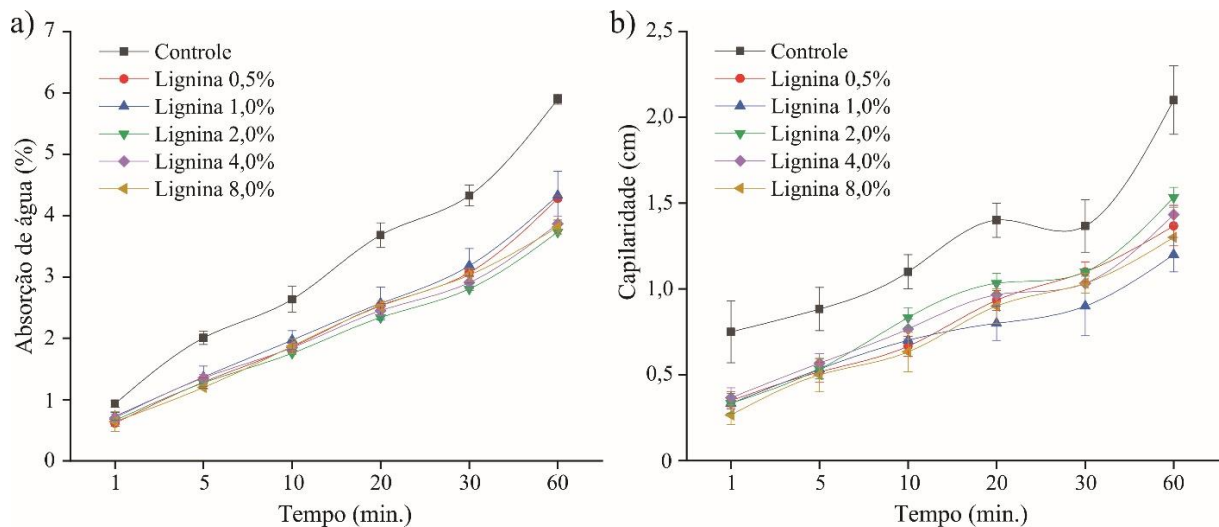
Na Figura 7 é possível observar que os adobes com 2% de lignina não apresentaram valores semelhantes ao controle, apresentando um decréscimo de 16,7% na resistência à compressão. A lignina Kraft, além de se apresentar como um pó fino, também apresenta densidade aparente bastante inferior ( $0,505 \pm 0,008 \text{ g/cm}^3$ ) a densidade do rejeito ( $3,080 \text{ g/cm}^3$ ), promovendo adobes mais leves e, conseqüentemente, também, propiciando menores resistências à compressão, em função da correlação positiva entre densidade e resistência comumente observadas em materiais compósitos (VILELA *et al.*, 2020). O valor encontrado de resistência à compressão para o tratamento sem lignina foi de 1,20 MPa, que atende ao requisito mínimo de resistência à compressão considerado pelo padrão peruano NTE E0 .80 [45], sendo este de 1,18 MPa.

Vale ressaltar que a adição de lignina Kraft na matriz de adobe teve por objetivo primário diminuir sua afinidade com a água e não necessariamente melhorar suas propriedades mecânicas. Para isso, a adição de fibras vegetais e sintéticas e correção do solo com areia, por exemplo, seriam técnicas adequadas para um incremento nas propriedades mecânicas, como demonstrado em estudos anteriores (CASTRILLO; CORRÊA *et al.*, 2015; IOANNOU; PHILOKYPROU, 2021; LETELIER *et al.*, 2020; LETELIER *et al.*, 2021).

### 3.4 Propriedades Físicas

A adição de lignina Kraft diminuiu a absorção de água e capilaridade dos adobes, indicando que apesar das maiores quantidades de grupos hidroxílicos em comparação com a lignina nativa, a lignina Kraft ainda apresenta características de hidrofobicidade capazes de atuar como estabilizante nos adobes produzidos com rejeito de mineração (Figura 8).

Figura 8 - Valores percentuais de absorção de água em função do tempo nos adobes (a); Capilaridade dos adobes em função do tempo nos adobes (b).



Fonte: Da autora (2023).

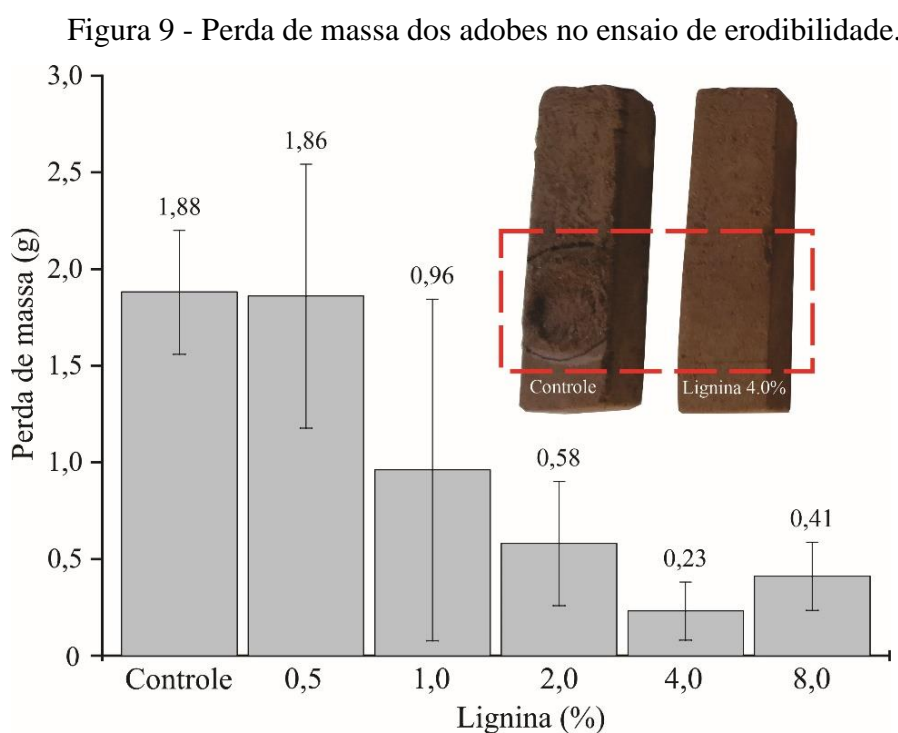
Na Figura 8 foi possível observar que independente do teor de lignina Kraft adicionada nos adobes, a absorção de água e a capilaridade foram significativamente menores que no Adobe controle. Dentre os tratamentos, os adobes com 2, 4 e 8% de adição de lignina apresentaram os menores valores de absorção de água após 60 minutos de exposição.

Devido a lignina apresentar estrutura amorfa, de alta massa molar e majoritariamente aromática, apresenta esse caráter hidrofóbico. No entanto, em função de grupos hidroxilas consegue se ligar com a celulose e hemiceluloses através de ligações éter (BRIENZO, 2008). Dessa forma, acredita-se que a lignina Kraft consiga se ligar com as partículas de rejeito, atuando como estabilizante físico-químico. Na literatura, inúmeros trabalhos vêm estudando esse aspecto compatibilizante da lignina em compósitos (BAYNAST *et al.*, 2022; GADIOLI *et al.*, 2014; GRAUPNER *et al.*, 2014; MORANDIM-GIANNETTI *et al.*, 2012;; WEI; SAKAI, 2022). No processo Kraft ocorre quebra das macromoléculas e consequente aumento dos grupos hidroxilas na lignina, que apresentam potencial de ligação com as partículas de rejeito de

mineração, o que conferiu aos adobes com adição de lignina um caráter menos hidrofílico (Figura 8).

Outro ponto de sinergia entre os materiais está associado ao fato de que em pH neutro, a lignina Kraft é hidrofóbica com 1 a 2% de enxofre na forma de grupos tiol alifático (CHUNG; WASHBURN, 2015; DOHERTY *et al.*, 2011). O que corroborou com o aspecto de hidrofobicidade dos adobes, devido ao pH do rejeito de mineração ser neutro (pH de 7,2 – Tabela 2).

Corroborando com os resultados obtidos para absorção de água e capilaridade, os adobes com adição de lignina Kraft também apresentaram menor perda de massa e deformação em função da erosão hídrica, conforme apresentado na Figura 9.



Fonte: Da autora (2023).

Dentre as adições avaliadas, as concentrações de 2, 4 e 8% de lignina Kraft se destacaram. A menor perda de massa foi observada para os adobes com 4% de lignina, não sendo possível verificar visualmente nenhum efeito do gotejamento de água nos mesmos, enquanto os adobes controle apresentaram profundidade da cavidade formada pela erosão hídrica de 5 mm (Figura 9). Conforme índice de erodibilidade citado no estudo de Letelier *et al.* (2020), os níveis variam em erosivo (classe 3), muito erosivo (classe 4) e reprovado no teste (classe 5). A classe 3 compreende profundidade de erosão entre 5 e 10 mm, a classe 4 entre 10 e 15 mm e a classe 5 acima de 15 mm. Dessa forma, os adobes de rejeito de mineração se

enquadraram na classe 3, como material erosivo. Isso implica que a adição de lignina trouxe certa hidrofobicidade ao adobe, como também atuou como aglutinante, aderindo as partículas de rejeito.

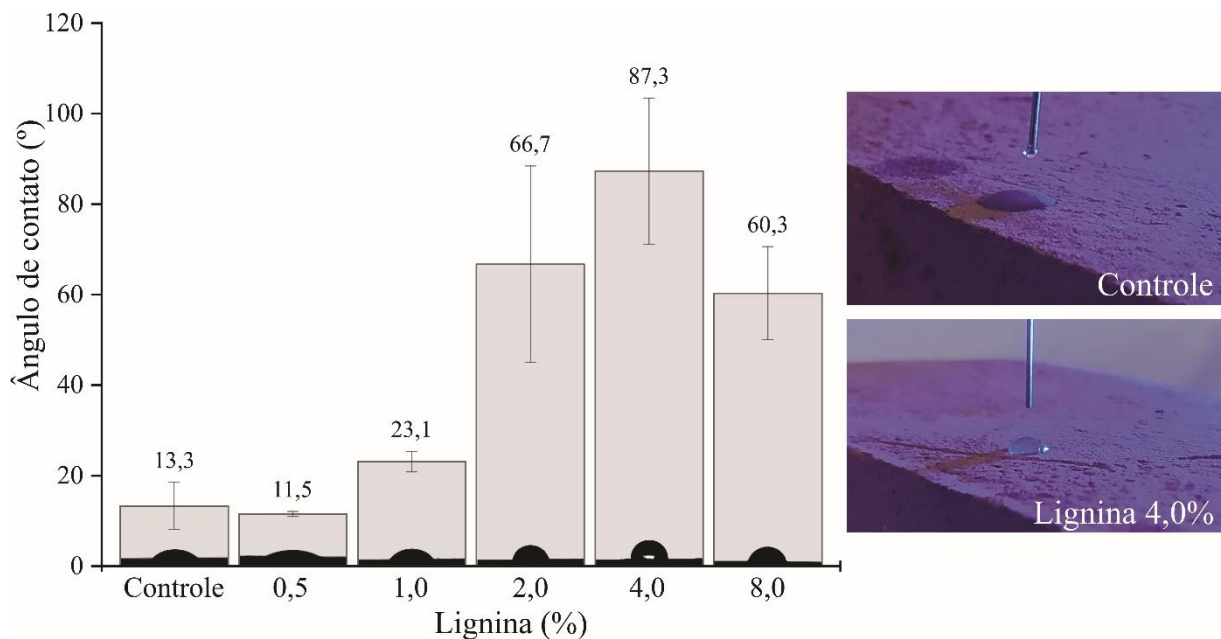
A lignina atuou como estabilizante físico-químico, diminuindo significativamente a absorção de água pelos adobes, como também foi capaz de modificar um adobe de rejeito de mineração classificado como erosivo para não erosivo com o uso de 4% em adição de lignina Kraft. É importante salientar que a susceptibilidade a água é o principal ponto de atenção, quando se fala em desenvolvimento de adobes, sendo este, o tema de inúmeras pesquisas (ARAYA-LETELIER *et al.*, 2021; CORREA *et al.*, 2015; CASTRILLO; IOANNOU; PHILOKYPROU, 2021; ESLAMI; MOHAMMADI; BANADAKI, 2022). No estudo de Letelier *et al.* (2020), foi avaliado a incorporação de fibras provenientes de penas de frangos, onde foi possível reduzir de classe 5 (reprovado) para classe 3 (erosivo) os adobes em estudo.

Em outro estudo realizado por Letelier *et al.* (2021), que produziu misturas de adobe com fibras de juta, variando quantidades de fibra e comprimento de fibra, os adobes referência (sem fibra) foram classificados como classe 5 de erodibilidade (reprovado), indicando que a mistura não é adequada para o uso. O restante dos adobes com fibra de juta, com exceção daqueles com 0,5% de fibra, classificaram-se como classe 3 de erodibilidade, ou seja, mistura erosiva. Observou-se que a incorporação de fibras nos adobes aumenta a resistência à erosão hídrica, através da ligação satisfatória entre as fibras de juta e a matriz argilosa. Tal ligação se dá devido a aspectos como a rugosidade da superfície das fibras de juta, relação de aspecto e contração de volume limitada.

A adição de lignina Kraft nos adobes foi capaz de modificar a classe de erosivo para não erosivo, sendo o teor ótimo encontrado igual a 4% de adição de lignina Kraft para essa propriedade. Provavelmente esse foi o teor em que a lignina Kraft conseguiu formar o maior número de ligações químicas ou interações químicas com a matriz (o rejeito de mineração), de forma a diminuir de maneira otimizada o número de hidroxilas livres entre as matérias-primas.

Mesmo prevendo que devido à grande afinidade dos adobes com a água, a análise de ângulo de contato pudesse ser prejudicada, a análise foi conduzida. Não foi possível mensurar a molhabilidade em função da medição angular aos 5 e 60 segundos (a gota no adobe controle foi totalmente absorvida), no entanto, a medição do ângulo de contato ao primeiro segundo de contato da gota com a superfície do adobe foi mensurada. Novamente, os resultados obtidos nos adobes com 4% de adição de lignina Kraft foram surpreendentes e demonstraram o potencial da lignina Kraft como estabilizante físico-químico dos adobes produzidos com rejeito de mineração (Figura 10).

Figura 10 - Ângulo de contato dos adobes com diferentes teores de lignina Kraft.



Fonte: Da autora (2023).

Na Figura 10 é possível verificar a grande diferença entre os ângulos de contato nos adobes em função da adição de 4% de lignina Kraft. Em relação a classificação do ângulo de contato, valores entre 0-90° indicam superfícies susceptíveis ao molhamento, enquanto os valores do ângulo de contato entre 90-180° classificam o material como hidrofóbico e parcialmente lipofílico (SAHRAEE *et al.*, 2017). Apesar do resultado médio dos adobes com 4% de lignina Kraft ainda serem classificados como superfície hidrofílica (<90°), do total de 15 medições, muitas apresentaram ângulos superiores a 90°, como pode ser visto na barra de desvio padrão (Figura 10). Isso ocorreu devido a organização mais compacta e estrutura menos porosa do adobe com lignina Kraft, aliado ao comportamento aglutinante e hidrofóbico que o estabilizante conseguiu propiciar de forma otimizada ao rejeito de mineração nos adobes com 4% de lignina Kraft.

#### 4 CONCLUSÕES

Os resultados demonstram que o rejeito de mineração proveniente do rompimento da barragem do fundão em Mariana-MG, Brasil, apresenta potencial para a produção de adobes, contribuindo para mitigar os impactos ambientais provenientes do desastre ambiental. Em função da resistência mecânica dos adobes controle ficarem muito marginal aos requisitos

mínimos exigidos em norma técnica, é recomendado que se faça uma correção com areia ou mesmo, uma adição de fibras vegetais como reforço.

A adição de lignina nos adobes propiciou estabilização físico-química diferenciada, tornando os adobes com 4% de lignina muito estáveis, diminuindo a absorção de água e efeito da capilaridade, mudando a classe de erodibilidade dos adobes com rejeito de mineração de erosivo para não-erosivo. Pode-se afirmar que além da menor afinidade com a água, os adobes com lignina Kraft ficaram coesos e resistentes aos impactos da gotícula de água em sua superfície, evidenciando o efeito aglutinante da lignina no rejeito de mineração.

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 6502: Rochas e Solos – Terminologia. Rio de Janeiro, 1995. 18p.

ALWADANI, N.; GHAVIDEL, N.; FATEHI, P. **Surface and interface characteristics of hydrophobic lignin derivatives in solvents and films**, v. 609, p. 125-656, 2021.

BRASIL. Laudo Técnico Preliminar IBAMA. Publicado em 26 de novembro de 2015. Disponível em:<

[https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo\\_tecnico\\_preliminar\\_ibama.pdf](https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf)> Acesso em: 02 jan. 2023.

ARAYA-LETELIER, G. *et.al.* Experimental evaluation of adobe mixtures reinforced with jute fibers, **Construction and Building Materials** 276 (2021) 122127. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122127>.

ARAYA-LETELIER, G. H. *et al.* Waste-based natural fiber reinforcement of adobe mixtures: Physical, mechanical, damage and durability performance assessment, **Journal of Cleaner Production**, Volume 273, 2020, 122806, ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122806>. Acesso em: 05 fev. 2023.

BAYNAST, Hélène de *et. al.* Effects of Kraft lignin and corn cob agro-residue on the properties of injected-moulded biocomposites, **Industrial Crops and Products**, Volume 177, 2022, 114421, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114421>. Acesso em: 05 fev. 2023.

BRIENZO, M. **Extração da hemicelulose do bagaço de cana-de-açúcar para obtenção de pentoses e xilooligossacarídeos**. Exame de qualificação (Doutorado em Biotecnologia Industrial) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena/SP, 2008.

BUI, TTH, 2021. **Estudo sobre a melhoria do desempenho de compósitos cimentícios reforçados com fibras de coco**. Tese de doutorado, Université de Caen Normandie, 192p. (Inglês). Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03240390> . Acesso em: 10 mar. 2023.

CARVALHO, Thaís Márjore Pereira de ; LOPES, Wilza Gomes Reis. A arquitetura de terra e o desenvolvimento sustentável na construção civil. In: **VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**. Palmas – Tocantins, 2012.

CASTRILLO ,Maria Costi de; IOANNOU, Ioannis; PHILOKYPROU Maria. Reproduction of traditional adobes using varying percentage contents of straw and sawdust, **Construction and Building Materials** 294 (2021) 123516. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123516>. Acesso em: 11 mar. 2023.

CHUNG, H.; WASHBURN, N. R. **Extraction and Types of Lignin**. Ed. Elsevier Inc., 2015

CORRÊA , Andréa Aparecida Ribeiro *et. al.* Incorporation of bamboo particles and “synthetic termite saliva” in adobes, **Construction and Building Materials**, 98 (2015) 250–256. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.009>. Acesso em: 11 mar. 2023. Acesso em: 11 mar. 2023.



DOHERTY, W. O. S.; MOUSAVIOUN, P.; FELLOWS, C. M. Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers. *Industrial Crops and Products*, v. 33, n. 2, p. 259–276, 2011.

DORMOHAMADI, Mansoure; RAHIMNIA, Reza. Combined effect of compaction and clay content on the mechanical properties of adobe brick, **Case Studies in Construction Materials**, v. 13, 2020, e00402, ISSN 2214-5095. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00402>. Acesso em: 15 mar. 2023.

ESLAMI, Abolfazl; MOHAMMADI, Hosein; BANADAKI, Hosein Mirabi. Palm fiber as a natural reinforcement for improving the properties of traditional adobe bricks, **Construction and Building Materials**, 325 (2022) 126808, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126808>. Acesso em: 15 mar. 2023.

GADIOLI, R. *et. al.* The role of lignin in polypropylene composites with semi-bleached cellulose fibers: mechanical properties and its activity as antioxidant. **Polymer Degradation and Stability**, v. 108, p.23-34, 2014.

GRAUPNER, Nina; FISCHER, Holger; ZIEGMANN, Gerhard Jörg Müssig. Improvement and analysis of fibre/matrix adhesion of regenerated cellulose fibre reinforced PP-, MAPP- and PLA-composites by the use of Eucalyptus globulus lignin, **Composites Part B: Engineering**, Volume 66, 2014, Pages 117-125, ISSN 1359-8368. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.05.002>. Acesso em: 28 mar. 2023.

HUSSAIN, Mazhar *et. al.*, Reuse of harbour and river dredged sediments in adobe bricks. **Cleaner Materials**, Volume 3, 2022, 100046, ISSN 2772-3976, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100046>. Acesso em: 28 mar. 2023.

MINKE, G. **Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y sus aplicaciones en la arquitectura actual**. Uruguay: Nordan-Comunidad, 2001.

MORANDIM-GIANNETTI, Andréia A. *et. al.* Lignin as additive in polypropylene/coir composites: Thermal, mechanical and morphological properties, **Carbohydrate Polymers**, Volume 87, Issue 4, 2012, Pages 2563-2568, ISSN 0144-8617, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.11.041>. Acesso em: 15 mar. 2023.

MORSY, Mohamed I. *et. al.* Recycling rice straw ash to produce low thermal conductivity and moisture-resistant geopolymer adobe bricks. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, Issue 5, 2022, Pages 3759-3771, ISSN 1319-562X. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.046>. Acesso em: 10 mar. 2023.

MUÑOZ, P. *et. al.* Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 254, 2020, 119314, ISSN 0950-0618, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119314>. Acesso em: 28 mar. 2023.

New Zealand Standards, NZS 4298 **Materials and Workmanship of Earth Buildings**, 1998.

NTE E0.80 (2017) ADOBE: NORMA TÉCNICA DE EDIFICACIÓN, Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

PEREIRA, Luiz Henrique Meneses. **Edificações sustentáveis: construções com tijolo de adobe**. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído ênfase em Sustentabilidade, da Escola de Engenharia da UFMG. 2019.

SAHRAEE, Samar *et al.* Effect of corn oil on physical, thermal, and antifungal properties of gelatin-based nanocomposite films containing nano chitin, **LWT - Food Science and Technology**, V.76, Part A, 2017, Pages 33-39, ISSN 0023-6438, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.10.028>. Acesso em: 29 mar. 2023.

SALIBA, E. O. S. *et. al.* Ligninas – métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, v. 31, p. 917-928, 2001.

SANTOS, N. S.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. D. Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70, **revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.

SEIFI S, N. SEBAIBI, D; LEVACHER, M. Boutouil. Desempenho mecânico de uma argamassa seca sem cimento, à base de cinzas volantes de papel e escória de alto-forno **J. Construir. Eng.** , 22 ( 2018 ) , pp. 113 - 121 ,10.1016/j.job.2018.11.004

TAVERNA, M. E. *et. al.* Effect of Kraft Lignin from Hardwood on Viscoelastic, Thermal, Mechanical and Aging Performance of High Pressure Laminates. **Waste Biomass Valor**, 10, 585–597 (2019).Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0088-6>. Acesso em: 29 mar. 2023.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY – TAPPI (2014) Surface wettability of paper (angle of contact method). T 458 cm-14. TAPPI Press, Norcross.

VAZ JUNIOR, Silvio; BARBOSA, Bianca Moreira. Qualidade da lignina Kraft e de resíduos lignocelulósicos para uso energético. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 15 p., 2022, Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1147954>. Acesso em: 31 mar. 2023.

VILELA, Alan Pereira *et. al.* Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste, **Construction and Building Materials**, Volume 262, 2020, 120883, ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>. Acesso em: 04 abr. 2023.

WEI, Ren; SAKAI, Yuya. Improving the properties of botanical concrete based on waste concrete, wood, and kraft lignin powder, **Powder Technology**, Volume 397, 2022, 117024, ISSN 0032-5910. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.11.068>. Acesso em: 04 abr. 2023.