



**BIANCA DE FÁTIMA SOUZA**

**POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE TUBOS DE  
PAPEL KRAFT NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE CIMENTO  
PORTLAND**

**LAVRAS – MG**

**2024**

**BIANCA DE FÁTIMA SOUZA**

**POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE TUBOS DE PAPEL KRAFT NA  
PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE CIMENTO PORTLAND**

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

Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva  
Orientador

Dra. Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira  
Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2024**

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

Souza, Bianca de Fátima.

Potencial da utilização de resíduos de tubos de papel kraft na produção de painéis de cimento Portland / Bianca de Fátima Souza. - 2024.

45 p. : il.

Orientador(a): Keoma Defáveri do Carmo e Silva.

Coorientador(a): Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Cimento-madeira. 2. Fibra. 3. Pinus oocarpa. I. Silva, Keoma Defáveri do Carmo e. II. Oliveira, Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de. III. Título.

**BIANCA DE FÁTIMA SOUZA**

**POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE TUBOS DE PAPEL KRAFT NA  
PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE CIMENTO PORTLAND**

**POTENTIAL OF USING WASTE KRAFT PAPER TUBES IN THE PRODUCTION OF  
PORTLAND CEMENT PANELS**

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

APROVADA em 30 de agosto de 2024.

Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva – UFOP

Dra. Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira – UFC

Dr. José Benedito Guimarães Junior – UFLA

Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva – UFOP

Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva  
Orientador

Dra. Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira  
Coorientadora

**LAVRAS – MG**

**2024**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me concedido força, fé e sabedoria para enfrentar os desafios e alcançar as conquistas.

Aos meus pais, Lucelma e César, e à minha família, meu mais profundo agradecimento pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pelos ensinamentos que me guiaram até aqui.

Ao meu namorado, Bruno, por seu carinho, paciência e compreensão, que foram fundamentais para que eu pudesse dedicar-me aos estudos e alcançar meus objetivos.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado, oferecendo amizade, apoio e momentos de leveza. Suas palavras de incentivo e as risadas compartilhadas tornaram minha jornada mais prazerosa e menos solitária.

Ao meu orientador, Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva, e à minha coorientadora, Bárbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira, pela orientação, dedicação e comprometimento. Sua sabedoria e visão crítica foram essenciais para o sucesso deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras, pela excelência do ensino e pela oportunidade de crescimento que me proporcionou. Agradeço a todos os professores, técnicos e colaboradores que contribuíram para a minha formação e para que eu chegasse até aqui.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro que possibilitou a realização desta pesquisa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Agradeço pela confiança e por incentivar a produção de conhecimento e o desenvolvimento acadêmico.

## RESUMO

Os painéis de cimento-madeira são compostos principalmente de cimento, madeira, água e um aditivo acelerador de cura. Este estudo tem como objetivo investigar o uso de resíduos da empresa Tubominas na fabricação desses painéis, substituindo a madeira, parcial ou totalmente, por resíduos de tubos de papel kraft (RTK). Foram produzidos painéis com diferentes proporções de madeira e resíduos: 100% madeira (referência), 50% resíduo e 50% madeira, 100% resíduo e 100% resíduo com 1% de polipropileno (em relação ao cimento). Inicialmente, foram realizados ensaios químicos e físicos na madeira e nos resíduos, além de ensaios morfológicos nas fibras (madeira, resíduo e polipropileno). A preparação dos compósitos para os painéis seguiu a proporção 1:0,37:0,06:0,50 (cimento:madeira:aditivo:água) e foi feita em betoneira mecânica. A produção dos painéis ocorreu por prensagem hidráulica automática a temperatura ambiente, aplicando-se 4 MPa de pressão por 10 minutos, permanecendo grampeados por um período de 24 horas para permanecer a pressão. Após 28 dias de cura, os painéis foram submetidos a ensaios de caracterização física (densidade, absorção de água, inchamento em espessura), mecânica (resistência e rigidez à tração na flexão, ligação interna e compressão) e microestrutural. A comparação entre a madeira e o resíduo demonstrou que este último possui características mais favoráveis para aplicação no painel. No entanto, os ensaios indicaram que a adição de resíduo reduziu a resistência mecânica geral dos painéis, embora a resistência à tração na flexão tenha permanecido dentro dos padrões normativos. A incorporação de fibra de polipropileno aumentou significativamente a resistência à tração na flexão, superando inclusive os valores observados no painel de referência.

**Palavras-chave:** cimento-madeira; fibra; *Pinus oocarpa*; polipropileno.

## ABSTRACT

Wood-cement panels are composed mainly of cement, wood, water and a curing accelerator additive. This study aims to investigate the use of waste from the company Tubominas in the manufacture of these panels, replacing wood, partially or totally, with waste from kraft paper tubes (RTK). Panels were produced with different proportions of wood and waste: 100% wood (reference), 50% waste and 50% wood, 100% waste and 100% waste with 1% polypropylene (in relation to cement). Initially, chemical and physical tests were performed on the wood and waste, in addition to morphological tests on the fibers (wood, waste and polypropylene). The preparation of the composites for the panels followed the proportion 1:0.37:0.06:0.50 (cement:wood:additive:water) and was done in a mechanical concrete mixer. The panels were produced by automatic hydraulic pressing at room temperature, applying 4 MPa of pressure for 10 minutes, and remaining clamped for a period of 24 hours to maintain the pressure. After 28 days of curing, the panels were subjected to physical characterization tests (density, water absorption, swelling in thickness), mechanical tests (strength and stiffness in flexure, internal bonding and compression) and microstructural tests. The comparison between the wood and the waste showed that the latter has more favorable characteristics for application in the panel. However, the tests indicated that the addition of waste reduced the overall mechanical resistance of the panels, although the tensile strength in flexure remained within the normative standards. The incorporation of polypropylene fiber significantly increased the tensile strength in flexure, even exceeding the values observed in the reference panel.

**Keywords:** cement-wood; fiber; *Pinus oocarpa*; polypropylene.

## **INDICADORES DE IMPACTO**

O estudo analisou o potencial de substituição da madeira por resíduos de tubos de papel kraft (RTK), na fabricação de painéis de cimento-madeira, propondo uma abordagem sustentável para o reaproveitamento de resíduos industriais, da empresa Tubominas. Foram produzidos painéis com diferentes proporções de madeira e RTK, além de uma variante com 1% de polipropileno, sendo submetidos a ensaios químicos, físicos, mecânicos e microestruturais. Os resultados destacaram que o RTK possui características técnicas adequadas para aplicação nos painéis, com desempenho em resistência à tração na flexão dentro dos padrões normativos, mesmo com redução da resistência mecânica geral. A adição de fibras de polipropileno elevou a resistência à tração, superando os valores dos painéis de referência compostos por madeira pura. Esses resultados evidenciam os impactos tecnológicos do uso de RTK na produção de materiais cimentícios inovadores, viabilizando alternativas sustentáveis para a gestão de resíduos e a construção civil, com benefícios ambientais e avanço em técnicas produtivas.

## **IMPACT INDICATORS**

The study analyzed the potential for replacing wood with waste kraft paper tubes (RTK) in the manufacture of wood-cement panels, proposing a sustainable approach for the reuse of industrial waste from the company Tubominas. Panels with different proportions of wood and RTK, as well as a variant with 1% polypropylene, were produced and subjected to chemical, physical, mechanical and microstructural tests. The results highlighted that RTK has technical characteristics suitable for application in panels, with flexural tensile strength performance within normative standards, even with a reduction in overall mechanical strength. The addition of polypropylene fibers increased tensile strength, surpassing the values of reference panels composed of pure wood. These results highlight the technological impacts of using RTK in the production of innovative cementitious materials, enabling sustainable alternatives for waste management and civil construction, with environmental benefits and advances in production techniques.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Preparo do resíduo .....	21
Figura 2 - Fibras: a) madeira Pinus oocarpa; b) RTK e c) polipropileno .....	21
Figura 3 - Remoção de extrativos.....	23
Figura 4 - Etapas da produção dos painéis: a) cimento, RTK e aditivo pesados; b) dissolvendo o aditivo na água; c) bomba costal; d) cimento e RTK na betoneira; e) aspergindo a água e aditivo com a betoneira ligada; f) painéis na prensa hidráulica automática. ....	25
Figura 5 - Ensaio de flexão.....	26
Figura 6 - MEV das fibras de: a) madeira, b) RTK e c) polipropileno.....	30
Figura 7 - Densidade aparente dos painéis .....	31
Figura 8 - Absorção de água dos painéis .....	33
Figura 9 - Inchamento em espessura dos painéis .....	34
Figura 10 - Resistência a tração na flexão dos painéis .....	35
Figura 11 - Módulo de elasticidade dos painéis .....	36
Figura 12 - Ligação interna dos painéis .....	37
Figura 13 - Resistência a compressão dos painéis.....	38
Figura 14 - MEV dos painéis de: a) referência; b) 50% RTK; c) 100% RTK e d) 100% RTK mais 1% polipropileno.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normas empregadas para avaliação da composição química do resíduo e da madeira .....	22
Tabela 2 - Detalhamento do plano experimental dos painéis .....	24
Tabela 3 - Teores da caracterização química .....	28

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Cimento-madeira .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Fibras lignocelulósicas.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3</b>	<b>Resíduos de papel kraft .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4</b>	<b>Polipropileno .....</b>	<b>18</b>
<b>3.5</b>	<b>Cimento Portland.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>20</b>
<b>4.2</b>	<b>Métodos.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Caracterização química das fibras.....</b>	<b>22</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Caracterização física das fibras.....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Caracterização morfológica das fibras .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Produção dos painéis .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Caracterização microestrutural dos painéis.....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>28</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização das fibras.....</b>	<b>28</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Caracterização química.....</b>	<b>28</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Caracterização física .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Caracterização morfológica .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2</b>	<b>Caracterização dos painéis.....</b>	<b>30</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Propriedades físicas .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Propriedades mecânica.....</b>	<b>34</b>

<b>5.2.3</b>	<b>Caracterização microestrutural .....</b>	<b>38</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A área da construção é uma das principais responsáveis pelo uso de recursos, geração de resíduos e emissões de gases que causam o efeito estufa em escala mundial. Uma medida crucial para reduzir esses impactos é adotar um sistema de produção e consumo circular. O conceito de economia circular oferece um caminho de reduzir o uso de matérias-primas e os impactos ambientais associados a elas. Isso pode ser feito por meio de diferentes abordagens, como a implementação de sistemas alternativos ao descarte convencional no final da vida útil. No entanto, a mudança de estratégias, como a redução de materiais, reutilização e processos de reciclagem, precisa ocorrer durante a produção e distribuição, quando o consumo de materiais é necessário (Haigh, 2023).

Nos últimos dez anos, houve um aumento significativo no foco das pesquisas em diminuir o uso de recursos naturais e aprimorar a gestão de resíduos na indústria da construção civil. Diversas opções estão sendo exploradas para reduzir os resíduos nesse setor, que vão desde reutilizar resíduos como materiais de preenchimento até criar novos ligantes e materiais de construção civil (Argalis et al., 2024). Não apenas pode incentivar a reutilização de resíduos, mas também ajudar a mitigar a escassez de madeira (Yang et al., 2023).

Um exemplo de resíduo da construção civil é o resíduo de tubo de papel kraft (RTK). Esse tubo de papel kraft são moldes para concreto feitos de folhas de papel prensado e multilaminado, utilizando adesivos à base de água que não contêm solventes orgânicos, criando um produto totalmente reciclável (Tubominas, 2024).

Além disso, o uso de materiais provenientes de fontes naturais e renováveis, juntamente com materiais sintéticos, como o polipropileno, está se tornando uma tendência crescente para diminuir o consumo e o desperdício de matérias-primas (Barcellos et al., 2022). Essas fibras de polipropileno contribuem para melhorar a resistência mecânica do material (Da Silva; Cascudo; Bacarji, 2022).

O objetivo do estudo é abordar a incorporação do resíduo de tubos de papel kraft na produção de painéis de cimento Portland para aplicação na construção civil, através de um programa experimental que será analisado as propriedades química, física, mecânica e microscópica desses painéis. Espera-se com isso contribuir para o desenvolvimento sustentável de novos materiais e novas técnicas. A reutilização de resíduos na fabricação de produtos e materiais para a construção civil tem o potencial de resolver de forma substancial problemas relacionados ao descarte de resíduos e diminuir a necessidade de extrair materiais novos. Essa

abordagem tem o potencial de atenuar os impactos ambientais nos principais setores responsáveis por essas questões.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo principal da pesquisa é explorar o potencial dos resíduos de tubos de papelão na produção de painéis cimentícios, promovendo um destino sustentável para esses materiais e contribuir para o desenvolvimento sustentável de novos materiais e novas técnicas.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Cimento-madeira

Os painéis cimento-madeira são uma combinação do agregado, partículas ou fibras de madeira, do aglomerante cimento Portland, água e determinados aditivos químicos. Ultimamente foram observados progressos significativos para esses painéis, especificamente na indústria de mercadorias florestais. Aglutinantes inorgânicos tendo como especialidade o cimento Portland, sendo considerado um material aglutinante conveniente para painéis aglomerados. Painéis de cimento-madeira são classificados de maneira diferente de acordo com o tipo de madeira, como exemplo são: placas de aglomerado de cimento, placa de cimento de lã de madeira, placa de fibrocimento (Çavdar; Yel; Torun, 2022).

Na construção civil, o painel cimento-madeira é amplamente empregado em diversas aplicações, desde elementos estruturais até acabamentos como forros e revestimentos de parede, sendo especialmente popular na Europa e no Japão. Este painel destaca-se por suas excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico, menor densidade em comparação com painéis cimentícios convencionais, maior resistência mecânica e ao fogo, além de uma longa durabilidade, utilizando madeira proveniente de florestas cultivadas de forma sustentável (Fernanda et al., 2024).

Além disso, a aplicação desses painéis no Brasil pode atender a necessidade por materiais de baixo custo para proporcionar construções civis em grande escala, fácil acesso a matéria-prima na forma de resíduos do processamento mecânico da madeira e a independência do país na fabricação de cimento Portland (Iwakiri et al., 2015).

Os painéis de madeira foram desenvolvidos como uma solução para reutilizar os resíduos de madeira gerados pela construção e demolição. Para fortalecer esses painéis, o cimento Portland tem sido comumente empregado como aglomerante, garantindo resistência mecânica e longevidade. No entanto, essa mistura pode ocasionalmente causar problemas de enrijecimento (Rocha; Miranda, 2020).

Os painéis de cimento são suscetíveis a fissuras e possuem baixa resistência à tração. Portanto, incorporar fibras pode ser uma opção eficaz para reduzir esses efeitos indesejados (Da Silva; Cascudo; Bacarji, 2022). Foi constatado que incluir fibras curtas de várias naturezas e formas é uma estratégia eficaz para mitigar preocupações quanto à fragilidade e à resistência limitada à formação e propagação de rachaduras em materiais cimentícios. Ao longo das últimas décadas, diversos tipos de fibras, como as metálicas, sintéticas e naturais, têm sido

extensivamente testadas e algumas aplicadas com sucesso em projetos de engenharia (Pakravan; Ozbakkaloglu, 2019).

Os painéis são influenciados pela definição da matéria-prima, que é um dos ângulos mais importantes a serem examinados para a qualidade do produto final, visto que influencia todas as outras variáveis do procedimento para efetuar intervenções positivas ou negativas na manufatura (Mendes et al., 2017).

### **3.2 Fibras lignocelulósicas**

As fibras lignocelulósicas, como exemplo o papel kraft e a madeira, constituídas principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, podem ser empregadas como reforço em uma matriz (Hasan; Rabbi; Maruf Billah, 2022). Conferem aceitável performance como agregado lignocelulósico na fabricação dos painéis e não há deterioração da madeira por causa da alcalinidade do cimento (Miranda et al., 2020).

A utilização de fibras lignocelulósicas (papel kraft) como fonte renovável e sustentável em várias indústrias tem despertado bastante interesse, principalmente por sua habilidade em diminuir a necessidade de recursos convencionais derivados da madeira. Essas fibras representam uma importante iniciativa impulsionada tanto pela preocupação ambiental quanto pela busca por novas fontes de materiais (Hawanis et al., 2024).

Inicialmente, ao selecionar fibras como reforço em painéis de cimento, é essencial considerar três requisitos principais: (1) a compatibilidade das propriedades do material com a aplicação em painéis, (2) garantir uma interação adequada entre as fibras e a matriz para a transmissão eficaz de tensões e (3) manter uma relação de aspecto ideal para assegurar um comportamento eficaz após a fissuração (Ranjbar; Zhang, 2020). Adicionar fibras aos painéis pode trazer benefícios não só na prevenção de fissuras, mas também no aprimoramento de sua resistência mecânica (Bertelsen et al., 2021).

Os primórdios da economia circular necessitam do desdobramento atual de materiais conjuntos ecologicamente apropriados. Com isso, as fibras lignocelulósicas estão se destacando cada vez mais como uma possibilidade não tóxica e renovável. Inclusive, as fibras recicladas adquiridas por meio de resíduos lignocelulósicos, como o papelão, sacos de cimento ou jornal, manifestam claras vantagens quando relacionada com fibras naturais de celulose por causa do menor impacto ambiental acerca dos recursos naturais, custo reduzido e disponibilidade abundante (Sales; Cabral; Medeiros, 2021).

### 3.3 Resíduos de papel kraft

Os efeitos da polpação kraft sobre as propriedades da fibra lignocelulósica são multifacetados e envolvem diversos mecanismos de transformação que exercem uma influência significativa sobre a fibra resultante. A polpação kraft é uma técnica amplamente empregada na indústria de papel, na qual a madeira ou outros materiais lignocelulósicos são submetidos a um tratamento alcalino para a remoção seletiva da lignina. Esse processo resulta em mudanças marcantes na composição química, características físicas e propriedades gerais da fibra (Hawanis et al., 2024).

Com o contínuo crescimento econômico, uma quantidade significativa de resíduos sólidos é gerada a partir de áreas urbanas, indústrias e projetos de construção, levando à exaustão dos recursos naturais. Se esses resíduos não forem tratados de forma adequada, ocorrerá um desperdício de recursos e uma poluição ambiental. Diante da atual escassez de recursos e do declínio da saúde do ecossistema, torna-se essencial buscar a reciclagem desses resíduos e a utilização de materiais renováveis como alternativa (Guo et al., 2015).

A reutilização de resíduos de papel pode ser vista como uma alternativa para substituir as fibras naturais de celulose usadas em materiais de construção, já que esses resíduos são predominantemente compostos de celulose. As propriedades essenciais para a utilização dessas fibras em materiais de construção são a capacidade de absorção de água e a área superficial especial que elas apresentam (Guo et al., 2015).

O aumento da população intensifica a quantidade de resíduos gerados, sobretudo no que diz respeito aos materiais feitos de papelão. As fibras kraft, obtidas a partir de papelão, possuem uma resistência considerável à tração, porém também têm uma capacidade significativa de absorção de água, o que restringe suas aplicações na construção (Haigh et al., 2024).

Embora o papelão tenha uma alta taxa de reciclagem, uma parcela considerável desse material acaba sendo depositada em aterros sanitários. Transformar resíduos de papelão em fibras kraft pode proporcionar vantagens significativas em termos de sustentabilidade quando aplicadas na indústria da construção civil (Haigh et al., 2023).

A utilização comercial de fibras de papel kraft em sistemas compósitos ainda não é comum devido à falta de certeza sobre suas propriedades mecânicas e durabilidade. É essencial compreender melhor como esses resíduos se comportam na estrutura microscópica do concreto para incentivar mais o uso de resíduos têxteis e de papelão como uma opção alternativa de reforço em projetos compósitos (Haigh et al., 2024).

No entanto, utilizar resíduos na produção de materiais de concreto frequentemente enfrenta restrições, como disponibilidade e preocupações com custos. Assim, incorporar resíduos têxteis e de papelão, que são amplamente disponíveis, pode ser vantajoso por esses motivos (Haigh et al., 2024).

As fibras de papel kraft podem ser introduzidas em compósitos de cimento como um agente de preenchimento parcial ou reforço. No entanto, há uma quantidade limitada de pesquisas sobre o uso dessas fibras em comparação com suas alternativas sintéticas. Além disso, para promover a sustentabilidade na indústria da construção, incorporar fluxos de resíduos como papel kraft pode ser um passo significativo em direção às metas de redução de emissões (Haigh et al., 2024).

Um estudo da literatura revelou que as fibras de celulose presentes no papel kraft têm a capacidade de serem recicladas e utilizadas na produção de materiais de construção. Após o vidro e o plástico, o papel kraft se destaca como o resíduo reciclado mais relevante com potencial para ser utilizado em aplicações de argamassa e concreto, o que contribuiria para diminuir a necessidade de extrair materiais virgens (Haigh et al., 2021).

A reutilização de resíduos na fabricação de produtos e materiais para a construção civil tem o potencial de resolver de forma substancial problemas relacionados ao descarte de resíduos e diminuir a necessidade de extrair materiais novos. Essa abordagem tem o potencial de atenuar os impactos ambientais nos principais setores responsáveis por essas questões (Haigh et al., 2021).

### **3.4 Polipropileno**

Nos últimos anos, tem havido um interesse considerável no uso de fibras de polipropileno, em compósitos cimentícios, devido às suas notáveis características físicas e mecânicas (Pakravan; Ozbakkaloglu, 2019). Também estudos sobre combinação de materiais naturais renováveis com materiais sintéticos está se tornando cada vez mais uma abordagem promissora para diminuir o uso excessivo e o desperdício de matérias-primas derivadas da petroquímica (Barcellos et al., 2022).

Ao empregar fibras têxteis recicladas em materiais compostos, são enfrentados diversos desafios. Por exemplo, a presença de contaminação e impurezas frequentemente dificulta a aceitação comercial dessas fibras. Além disso, a qualidade variável das fibras pode resultar em inconsistências e aumentar as variáveis nos compostos. Essas inconsistências podem causar problemas de adesão e ligação, que por sua vez podem diminuir as propriedades mecânicas e

enfraquecer os efeitos microestruturais. Para mitigar esses efeitos adversos, é possível otimizar as técnicas de processamento, incluindo o pré-tratamento das fibras recicladas e técnicas de modificação de superfície. Além disso, a otimização combinada de várias fibras recicladas pode reduzir a variabilidade associada a um único tipo de fibra (Haigh et al., 2024).

Os materiais à base de cimento com fibras de polipropileno oferecem diversas vantagens. Em termos físicos, eles são mais resistentes a fissuras decorrentes da contração durante a secagem, reduzem a permeabilidade, suportam melhor o lascamento em condições de alta temperatura e apresentam aperfeiçoamentos na resistência ao congelamento e descongelamento. Em relação às propriedades mecânicas, esses materiais demonstram um aumento significativo na resistência à tração e flexão, além de maior ductilidade e resistência à flexão (Pakravan; Ozbakkaloglu, 2019).

### **3.5 Cimento Portland**

O cimento Portland é composto principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio, obtidos pela mistura de calcário e argila. Dependendo do tipo de cimento, a mistura pode incluir diferentes proporções de cal, sílica, hematita, alumina e magnésia. A produção do cimento envolve o aquecimento do calcário (carbonato de cálcio) até que ele se decomponha em dióxido de carbono e cal. Essa cal reage com a alumina, hematita e sílica da argila, formando o clínquer. O clínquer, que é o principal ingrediente do cimento, é resfriado e moído, e depois recebe a adição de gesso para evitar que reaja prematuramente com a água quando o cimento for utilizado (Oliveira et al., 2019).

Durante o endurecimento do cimento Portland, são liberadas grandes quantidades de calor devido às reações de hidratação. A temperatura resultante dessas reações é um dos parâmetros para avaliar a compatibilidade entre as fibras e o cimento. A variação da temperatura na mistura ao longo do tempo reflete a natureza exotérmica das reações de hidratação, que ocorrem até a cura e endurecimento do cimento. A adição de fibras altera o equilíbrio térmico do compósito e a intensidade dessas reações, tornando a temperatura máxima da reação de hidratação um indicador importante de compatibilidade do painel cimentício (Marques et al., 2016).

O cimento Portland tem desempenhado um papel fundamental na construção por séculos, por sua habilidade de ligar os materiais de construção e garantir resistência e estabilidade estrutural (Argalis et al., 2024).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

Na fabricação dos painéis, foi empregado cimento CPV-ARI, partículas de madeira de *Pinus oocarpa*, água e o aditivo químico cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), cuja finalidade é diminuir o tempo necessário para a pega e endurecimento da mistura em relação à massa de cimento. Também foram empregadas as fibras de resíduo de tubo de papel kraft e fibras de polipropileno.

A madeira de *Pinus oocarpa*, foi escolhida devido ser a mais utilizada na indústria de painéis. Foi obtida de árvores, com 28 anos de idade, cultivadas em testes realizados no terreno da Universidade Federal de Lavras (UFLA), localizada em Lavras, Minas Gerais. Após o corte, as toras foram levadas para a Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM) da UFLA, onde foram submetidas a um processo de cozimento em água a 65°C por 24 horas para torná-las mais maleáveis para a laminação. Em seguida, as toras foram laminadas em um laminador para produzir lâminas de 1,5 mm de espessura, que foram desfiadas manualmente e processadas em um moinho de martelo com uma peneira de 4 mm para gerar partículas do tipo sliver.

O RTK, proveniente da produção industrial, foi fornecido pela empresa Tubominas, em forma de aro de tubos, sediada em Elói Mendes, Minas Gerais. Os aros foram colocados na prensa hidráulica automática MA 098, a frio para diminuir o diâmetro e em seguida processados em um moinho de martelo com uma peneira de 4 mm. A Figura 1 demonstra as principais etapas desse preparo. As fibras de polipropileno possuem o mesmo tamanho, com 12 mm de comprimento e 12  $\mu\text{m}$  de diâmetro.

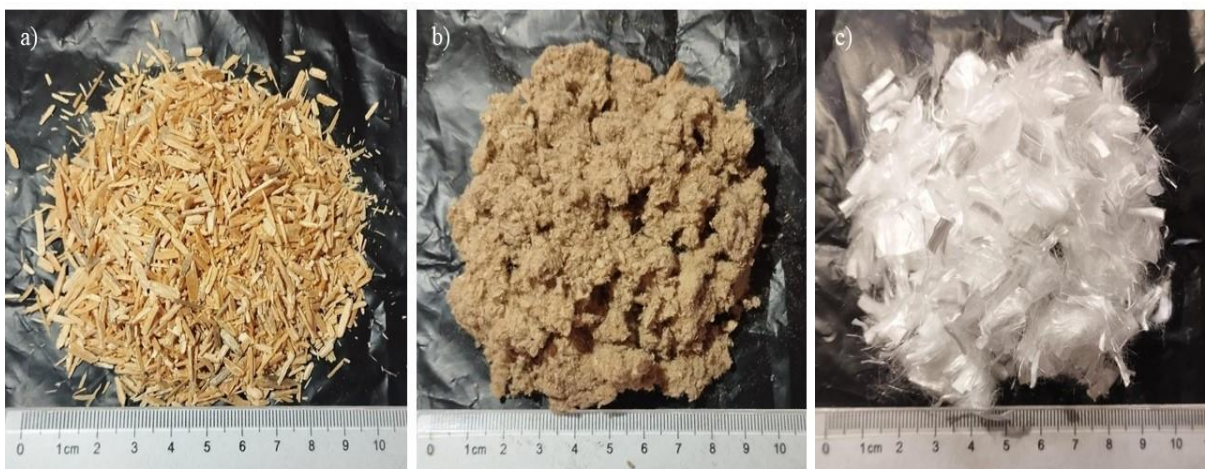
Figura 1 - Preparo do resíduo



Fonte: Do autor (2024)

Na Figura 2 estão apresentadas as fibras de madeira e resíduo, como ficaram após o processo de preparação delas, e também a fibra de polipropileno. Na Figura 2a é apresentado as fibras de madeira cominuídas, na Figura 2b é o RTK moído e na Figura 2c é a fibra de polipropileno usada como reforço.

Figura 2 - Fibras: a) madeira *Pinus oocarpa*; b) RTK e c) polipropileno



Fonte: Do autor (2024)

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Caracterização química das fibras

O RTK e a madeira foram caracterizados quanto ao teor de cinzas, extrativos, lignina, holocelulose, celulose e hemicelulose de acordo com as normas especificadas na Tabela 1. Onde primeiramente essas fibras passaram por um processo de peneiração, com peneiras sobrepostas, com aberturas de 40 mesh na peneira superior e 60 mesh na peneira inferior. As partículas que ficaram retidas na peneira inferior foram secas até umidade constante a uma temperatura de 60°C e separadas para análise química. Para cada análise foram realizadas três repetições. A Figura 3 mostra a primeira etapa da caracterização química, onde é retirado os extrativos do material (madeira/resíduo).

Tabela 1 - Normas empregadas para avaliação da composição química do resíduo e da madeira

<b>Teor</b>	<b>Norma</b>
Cinzas	Norma NBR 13999 (ABNT, 2003)
Extrativos	Norma NBR 14853 (ABNT, 2010)
Lignina	Norma NBR 7989 (ABNT, 2010)
Holocelulose	Browning (1963)
Celulose	Kennedy, Phillips e Willians (1987)
Hemicelulose	Diferença entre Holocelulose e Celulose

Fonte: Do autor (2024)

Figura 3 - Remoção de extrativos



Fonte: Do autor (2024)

#### 4.2.2 Caracterização física das fibras

A determinação da densidade básica das fibras de madeira e RTK usados neste estudo seguiu os critérios estabelecidos na NBR 11941 (ABNT, 2003) e a densidade aparente seguiu NBR 14984 (ABNT, 2003). As fibras utilizadas foram as passantes na peneira de 40 mesh e retidas na peneira de 60 mesh e secas em estufa na temperatura de 60 °C para umidade constante.

#### 4.2.3 Caracterização morfológica das fibras

A estrutura das fibras (madeira, RTK e polipropileno) foi examinada pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), equipamento LEO EVO 40 XVP (Carl Zeiss), empregando tensão de 25kV no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras. As amostras foram montadas sobre uma plataforma de alumínio, usando fita de carbono dupla face. Em seguida todas as amostras foram submetidas ao processo de metalização por *sputtering*, com deposição de um filme de ouro.

#### 4.2.4 Produção dos painéis

Foram estabelecidos os seguintes critérios para determinar as proporções dos materiais utilizados na fabricação dos painéis, visando alcançar uma densidade nominal de 1,10 g/cm<sup>3</sup>: relação de 1 parte de madeira para 2,67 partes de cimento, uma proporção de água para cimento de 0,50 e uma adição de 6% de CaCl<sub>2</sub> em relação à massa do cimento.

O RTK (resíduo de tubo de papel kraft) será usado em substituição a quantidade de madeira na produção dos painéis na proporção de 0%, 50%, 100% e 100% mais 1% (em relação ao cimento) de fibra de polipropileno. O detalhamento do plano experimental dos painéis está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Detalhamento do plano experimental dos painéis

<b>Tratamento</b>	<b>Cimento (g)</b>	<b>Madeira (g)</b>	<b>RTK (g)</b>	<b>Água (g)</b>	<b>CaCl<sub>2</sub> (g)</b>	<b>PP (g)</b>
Referência	1959,14	733,65	0,00	983,75	125,06	0,00
50% RTK	1959,14	366,82	366,82	983,75	125,06	0,00
100% RTK	1959,14	0,00	733,65	983,75	125,06	0,00
100% RTK+PP	1959,14	0,00	733,65	983,75	125,06	19,59

Fonte: Do autor (2024)

A mistura dos compósitos do painel foi realizada em uma betoneira mecânica, de acordo com Souza et al. (2022). Inicialmente foi adicionado o cimento e as fibras (madeira, RTK, polipropileno) e depois a água com o aditivo que foram aspergidos através de uma bomba costal, com a betoneira ligada, para melhor homogeneização. O tempo de mistura será em média de 6 minutos. Após a mistura foi conferido, manualmente, a compactidade do material. Os tratamentos de 50% RTK, 100% RTK e 100% RTK+PP necessitaram acrescentar 10% de água para melhorar a compactidade.

Com a mistura pronta, foi pesado 3.801,6 gramas do compósito, colocado em uma forma de alumínio (com borda para controle das dimensões) com dimensões de 48x48x1,5cm, untada com óleo de baixa viscosidade. Foram montadas 3 formas sobrepostas, grampeadas, colocadas na prensa hidráulica automática MA 098 com temperatura ambiente e pressão de 4 Mpa por 10 minutos. Depois continuaram grampeadas para permanecer a pressão por 24h. Após esse período os painéis permaneceram em uma sala climatizada numa temperatura de 20 ± 2°C e

umidade relativa de  $65 \pm 3\%$  até completar os 28 dias, tempo essencial de cura do cimento, para então realizar os cortes dos corpos de prova para os ensaios físico-mecânicos e microestrutural.

A Figura 4 demonstra algumas etapas da produção do painel. A Figura 4a mostra o cimento, o RTK e o aditivo devidamente pesados. Na Figura 4b o aditivo é dissolvido na água para depois serem colocados na bomba costal (Figura 4c). Já na Figura 4d, RTK e cimento são colocados na betoneira e depois a água e o aditivo são aspergidos (Figura 4e). Na Figura 4f a mistura foi colocada em 3 formas na prensa hidráulica automática.

Figura 4 - Etapas da produção dos painéis: a) cimento, RTK e aditivo pesados; b) dissolvendo o aditivo na água; c) bomba costal; d) cimento e RTK na betoneira; e) aspergindo a água e aditivo com a betoneira ligada; f) painéis na prensa hidráulica automática.



Fonte: Do autor (2024)

#### 4.2.5 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

Os corpos-de-prova, dos ensaios físicos e mecânicos, foram retirados dos painéis fabricados utilizando uma serra circular. Para analisar as características físicas e mecânicas, os painéis foram testados após 28 dias de processo de cura.

A densidade aparente, absorção de água e inchamento em espessura foram testados seguindo os protocolos da norma ASTM D-1037 (ASTM, 2012). Os testes de absorção de água

e inchamento em espessura foram realizados tanto em condições de equilíbrio quanto após imersão em água por 2 e 24 horas.

Para os testes de flexão em três pontos, tanto o módulo de ruptura (MOR) quanto o módulo de elasticidade (MOE) foram determinados conforme as especificações da norma DIN-52362 (1982). O aparelho para o ensaio é mostrado na Figura 5. Em seguida, os resultados foram comparados com os padrões de comercialização do Bison Wood-Cement Board (2017) e também com a NBR 15498 (2021). A densidade dos painéis também será comparada com a norma EN 323 (2007). As equações utilizadas para cálculo de MOR, MOE, ligação interna e compressão foram de acordo com as equações 1, 2, 3 e 4.

Figura 5 - Ensaio de flexão



Fonte: Do autor (2024)

$$\text{MOR} = \frac{3F_{\text{máx}}L}{2tb^2} \quad (1)$$

Onde:

MOR- módulo de ruptura (MPa);

F<sub>máx</sub>- carga máxima de ruptura atingida no ensaio, em N;

L- comprimento do vão (mm);

t- espessura da amostra (mm);

b- largura da amostra (mm).

$$MOE = \frac{L^3(F2-F1)}{4tb^3(a2-a1)} \quad (2)$$

Onde:

MOE- módulo de elasticidade (MPa);

L- comprimento do vão (mm);

F1 e F2- são cargas (N);

t- espessura da amostra (mm);

b- largura da amostra (mm);

a1 e a2- são deflexões no comprimento médio das amostras.

$$LI = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (3)$$

Onde:

LI- resistência de ligação interna (MPa);

Fmáx- carga máxima de ruptura atingida no ensaio (N);

A- área da seção transversal (mm<sup>2</sup>).

$$CP = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (4)$$

Onde:

CP- resistência à compressão (MPa);

Fmáx- carga máxima de ruptura atingida no ensaio (N);

A- área da seção transversal (mm<sup>2</sup>);

#### 4.2.6 Caracterização microestrutural dos painéis

Após a ruptura nos ensaios mecânicos, os painéis foram examinados pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), equipamento STEM - FEG de ultra-alta resolução, livre de campo, modelo CLARA (TESCAN, 2021), no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização das fibras

#### 5.1.1 Caracterização química

Os resultados dos ensaios químicos seguem apresentados na Tabela 3. A madeira *Pinus oocarpa* apresentou os valores de 0,27% cinzas, 10,45 % extrativos, 29,14% lignina, 74,07% holocelulose, 68,8% celulose e 15,27% hemicelulose. E os valores do RTK (resíduo de tubo de papelão) são 12,12% cinzas, 5,81% extrativos, 18,75% lignina, 83,55% holocelulose, 73,43% celulose e 10,12% hemicelulose. É possível notar que a madeira apresenta uma cinza, holocelulose e celulose menor do que o RTK, com diferença de 11,85%, 9,48% e 4,63%, respectivamente. Os valores de extrativos, lignina e hemicelulose variaram também, sendo da madeira maior do que RTK, com diferença de 4,64%, 10,39% e 5,15%, respectivamente. O elevado teor de cinzas do RTK possivelmente é devido ao adesivo utilizado no processo de produção do tubo de papel kraft.

Tabela 3 - Teores da caracterização química

<b>Fibras</b>	<b>Cinzas (%)</b>	<b>Extrativos (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Holocelulose (%)</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>
Madeira	(0,20)* 0,27	(0,48)* 10,45	(0,32)* 29,14	(1,20)* 74,07	(0,69)* 68,8	5,27
RTK	(0,13)* 12,12	(1,28)* 5,81	(0,30)* 18,75	(0,39)* 83,55	(1,95)* 73,43	10,12

\*Desvio padrão.

Fonte: Do autor (2024).

Através da análise é possível observar que a madeira obteve valores de cinza e lignina próximos aos encontrados por Vivian et al. (2020) e Narciso et al. (2023). Já o valor do RTK pode ser bom segundo Karimah et al. (2021), pois o aumento significativo no teor de celulose geralmente resulta em melhorias nas propriedades de resistência da fibra, enquanto a presença de lignina tem o efeito oposto, diminuindo essas propriedades. A celulose desempenha um papel crucial como reforço, ajudando a diminuir a fragilidade da madeira (Cabral et al., 2018). Já o teor de cinzas, de acordo com Castro (2021), prejudica o estágio inicial da hidratação do cimento.

No estudo de Nasser et al. (2016) os valores de extrativos foram próximos ao encontrados neste estudo. Os extrativos dos resíduos das madeiras *Conocarpus erectus*, *Ficus*

*altissima* e *Pithecellobium Dulce* foram próximos do valor de extrativos da madeira *Pinus oocarpa*. Já os valores de extrativos dos resíduos das madeiras *Acacia salicina* e *Leucaena glauca* foram próximos aos extrativos encontrado no resíduo de tubo de papel kraft. Neste mesmo estudo também foi encontrado valor de hemicelulose do resíduo de *Ficus altissima* similar ao encontrado no resíduo de tubo de papel kraft.

A hemicelulose presente no resíduo é maior que a da madeira, o que seria um indício que a interface entre madeira e matriz tem mais probabilidade de melhor aderência do que a interface entre resíduo e matriz. De acordo com Karimah et al. (2021) a presença de hemicelulose aumenta a capacidade de absorver água o que lhes confere propriedades hidrofílicas. Essas propriedades as tornam menos compatíveis na interação com matrizes que possuem características de hidrofobicidade.

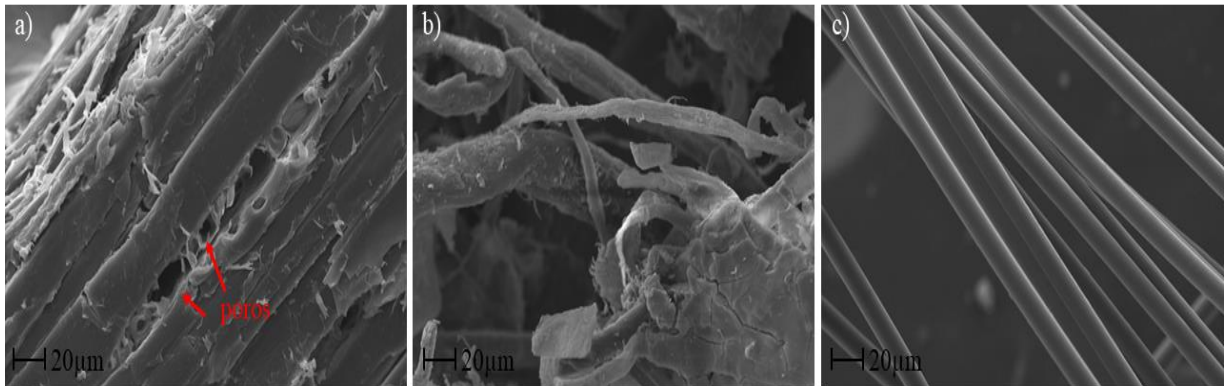
### **5.1.2 Caracterização física**

Os resultados de propriedades físicas, a densidade aparente, são 0,31 g/cm<sup>3</sup> para madeira e 0,21 g/cm<sup>3</sup> para RTK. Já a densidade básica teve valores de 0,22 g/cm<sup>3</sup> e 0,09 g/cm<sup>3</sup> para madeira e RTK, respectivamente. Geralmente, densidades mais baixas são preferíveis já que podem facilitar a moldagem e a manipulação dos materiais no painel. Porém, isso também pode afetar a espessura e o volume dos corpos de prova fabricados, devido ao aumento de partículas dentro do mesmo volume dos painéis (Vega Villarruel et al., 2023).

### **5.1.3 Caracterização morfológica**

As imagens das fibras de madeira, RTK e polipropileno obtidas através do MEV seguem apresentadas na Figura 6. A Figura 6a mostra a fibra da madeira de *Pinus oocarpa* com superfície irregular. Já na Figura 6b são as fibras de RTK entrelaçadas. Na Figura 6c são as fibras de polipropileno com superfície lisa.

Figura 6 - MEV das fibras de: a) madeira, b) RTK e c) polipropileno



Fonte: Do autor (2024).

Ao analisar a imagem de MEV da Figura 6a, é possível constatar as observações mencionadas no estudo de Do Prado Banczek et al. (2019) onde a madeira tem uma certa porosidade e sua superfície não é uniforme. Segundo Cabral et al. (2018) essa é uma característica interessante na fabricação de painéis cimentícios, pois durante a produção desses painéis, o cimento, na sua fase líquida, preenche os vazios e estabelece uma conexão entre o material de reforço e a matriz.

Usando MEV (Figura 6b) e de acordo com Pawde et al. (2024), nota-se que as fibras de celulose presentes no papel apresentam uma textura escamosa e áspera. A grande proporção de aspecto das fibras e as estruturas em forma de fibrila visíveis nas superfícies das fibras, são características comuns desse tipo de fibras (Rodríguez-Fabià; Chinga-Carrasco, 2022).

A observação na superfície da fibra de polipropileno, na Figura 6c, revela uma morfologia relativamente lisa e uniforme. A ausência de porosidades significativas sugere uma boa integridade estrutural do material, o que é crucial para garantir sua resistência e durabilidade em aplicações práticas.

## 5.2 Caracterização dos painéis

### 5.2.1 Propriedades físicas

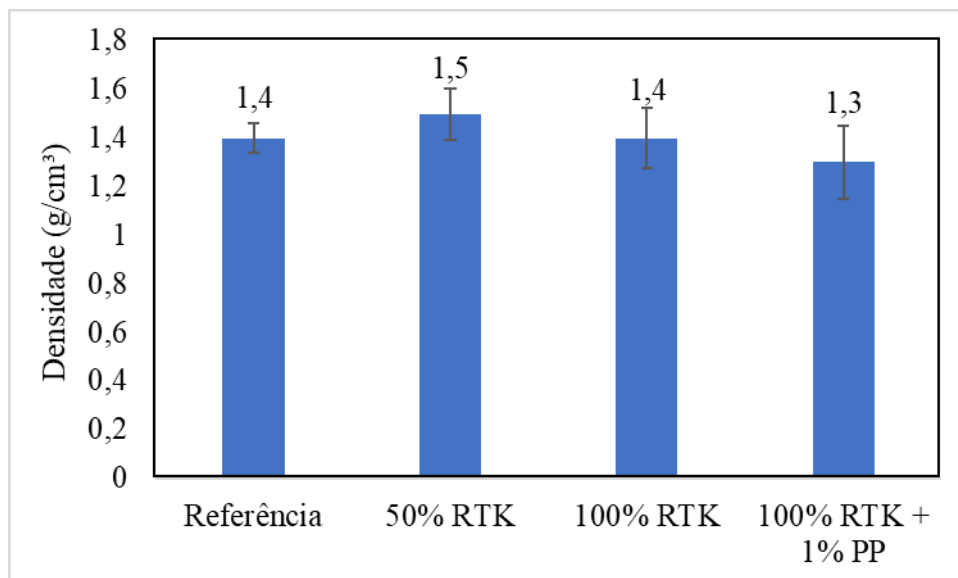
Na Figura 7 está apresentado os valores da densidade dos painéis. O painel de referência apresentou um valor de  $1,4 \text{ g/cm}^3$  e os painéis com 50% RTK, 100% RTK e 100% RTK mais 1% polipropileno, apresentaram  $1,5$ ,  $1,4$  e  $1,3 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. É possível notar que substituindo a madeira por 100% RTK não houve diferença na densidade, já quando acrescenta 1% de polipropileno apresentou uma pequena diferença de  $0,1 \text{ g/cm}^3$ . A densidade menor pode

ser atribuída à adição do polipropileno, que tem uma densidade menor em comparação com a madeira e o RTK. A presença de 1% de polipropileno pode introduzir microespaços ou diminuir a compactação do material, resultando em uma densidade global reduzida do painel.

Bison (2017) determina que a densidade dos painéis de cimento-madeira é no valor de  $1,25 \text{ g/cm}^3 \pm 10\%$ , enquanto a norma EN 323 (2007) determina a densidade desses painéis em  $1,35 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ . Deste modo, os valores de densidade dos painéis de referência, 100% RTK e 100% RTK mais 1% de polipropileno atenderam as determinações especificadas, enquanto o painel de 50% RTK atendeu somente a norma EN 323 (2007).

O resultado encontrado no painel de 100% RTK mais 1% de polipropileno obteve o mesmo valor do painel de cimento reforçado com madeira do estudo de Nasser et al. (2016). Este mesmo autor, afirma que nas fábricas de painéis de madeira, como os de aglomerado e cimento-madeira, escolher a densidade certa da placa é uma etapa crucial, e essa densidade deve ser escolhida de acordo com os requisitos específicos da aplicação. Como exemplo, placas com densidade baixa são geralmente empregadas para isolamento acústico, enquanto as de alta densidade são utilizadas na construção.

Figura 7 - Densidade aparente dos painéis



Fonte: Do autor (2024)

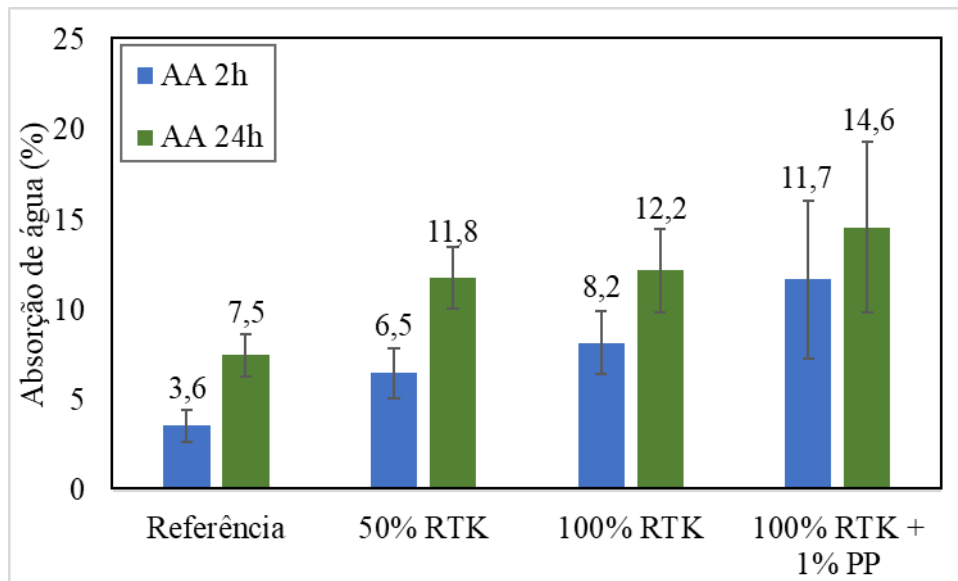
A Figura 8 apresenta os resultados de absorção de água (AA) dos painéis. Os resultados para absorção de água em 2 horas foram 3,6%, 6,5%, 8,2% e 11,7% para os painéis de referência, 50% RTK, 100% RTK e 100% RTK mais 1% polipropileno, respectivamente. Já os resultados para absorção de água em 24 horas são 7,5%, 11,8%, 12,2% e 14,6%,

respectivamente. Os resultados mostram que a adição de RTK, tanto em 50% quanto em 100%, aumenta a absorção de água dos painéis em comparação com o painel de referência. Resultado esperado devido o resíduo possuir teor de hemicelulose maior que a madeira, pois a hemicelulose aumenta a capacidade de absorver água. Além disso, a adição de 1% de polipropileno ao painel com 100% de RTK resulta em uma absorção de água ainda maior. Isso indica que o RTK, e em particular o RTK com polipropileno, torna os painéis mais suscetíveis à absorção de água, tanto em 2 h quanto em 24 h imersos na água. Motivo também que pode justificar a necessidade de acrescentar 10% de água no momento da fabricação do painel (50% RTK, 100% RTK e 100% RTK mais 1% polipropileno).

Os resultados de absorção de água para os painéis de 100% RTK mais 1% de polipropileno não foi o esperado, pois como o polipropileno é uma fibra hidrofóbica, esperava que essa fibra não iria aumentar a porcentagem de absorção de água do painel. Assim, o aumento na absorção de água pode ser resultado de alterações na estrutura do painel ou no processo de fabricação, e não exclusivamente pelas propriedades das fibras de polipropileno. Quando adicionadas ao painel, essas fibras podem modificar a microestrutura do painel, criando novos espaços ou canais onde a água pode se acumular ou ser absorvida. A presença dessas fibras pode também alterar a interação entre o cimento e o resíduo de tubo de papel kraft no painel. Assim, o aumento na absorção de água pode ser resultado de alterações na estrutura do material ou no processo de fabricação, e não exclusivamente pelas propriedades das fibras de polipropileno.

Apesar do polipropileno ter aumentado a porcentagem de absorção de água, o estudo de Cabral et al. (2018) encontrou uma porcentagem do painel maior, com diferença de 2,18%, comparado com o painel de 100% RTK mais 1% de polipropileno em imersão de 24h.

Figura 8 - Absorção de água dos painéis



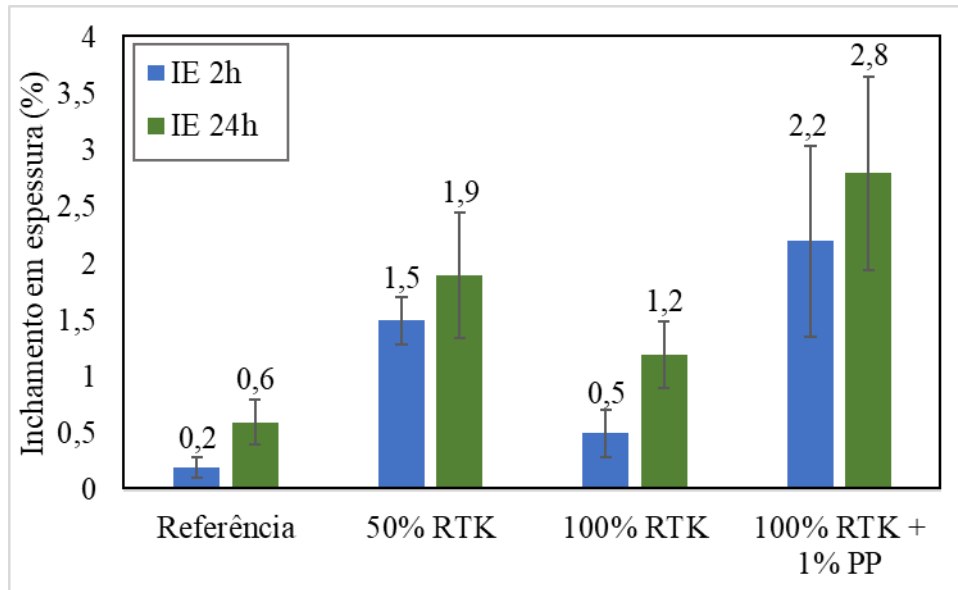
Fonte: Do autor (2024).

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos de inchamento em espessura (IE) dos painéis. Os valores de inchamento em espessura de 2h são 0,2%, 1,5%, 0,5% e 2,2%, para os painéis de referência, 50% RTK, 100% RTK e 100% RTK mais 1% de polipropileno, respectivamente. Já os valores 24h imersos na água são 0,6%, 1,9%, 1,2% e 2,8%, respectivamente. Os resultados indicam que a adição de RTK, seja 50% ou 100%, aumenta o inchamento em espessura dos painéis em relação ao painel de referência, tanto com 2 horas quanto com 24 horas de imersão na água. A adição de 1% de polipropileno ao painel com 100% de RTK aumenta ainda mais o inchamento, mostrando assim, conforme resultados encontrados no ensaio de absorção, que o polipropileno não contribui para reduzir a absorção de água dos painéis.

A porcentagem do inchamento em espessura de 24h do painel de referência foi próxima ao valor encontrado no estudo de (Cabral et al., 2018), tendo uma diferença de apenas 0,1%. Considerando o desvio padrão, esse valor pode até chegar ser o mesmo.

O método Bison (2017) define que os valores de inchamento em espessura de 2h e 24h deve ser no máximo 1% e 1,5% respectivamente. Deste modo, os valores do IE de 2h e 24h dos painéis de referência e de 100% RTK atenderam ambas definições, pois são inferiores ao valor máximo definido pela referência. Já os painéis de 50% RTK e 100% RTK mais 1% de polipropileno não atenderam as determinações especificadas tanto para imersão de 2h quanto para imersão de 24h, pois obtiveram valores superiores aos especificados pela referência.

Figura 9 - Inchamento em espessura dos painéis



Fonte: Do autor (2024)

### 5.2.2 Propriedades mecânica

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos de resistência a tração na flexão dos painéis. Os valores dos painéis para o módulo de ruptura foram 7,1 MPa para o de referência, 5,6 MPa o de 50% RTK, 5,5 MPa o de 100% RTK e 8,4 MPa para o de 100% RTK mais 1% polipropileno. É possível observar que comparando os painéis com 50% RTK e 100% RTK ambos obtiveram valores próximos e suas aplicações diminuí o valor do módulo de ruptura em relação ao painel de referência. Já com a adição de 1% de polipropileno ao painel com 100% de RTK resulta em um aumento de 52,73% na resistência à tração na flexão, comparado com o painel de 100% RTK. O polipropileno pode atuar como um agente de reforço, melhorando a coesão entre as partículas e aumentando a resistência global do painel.

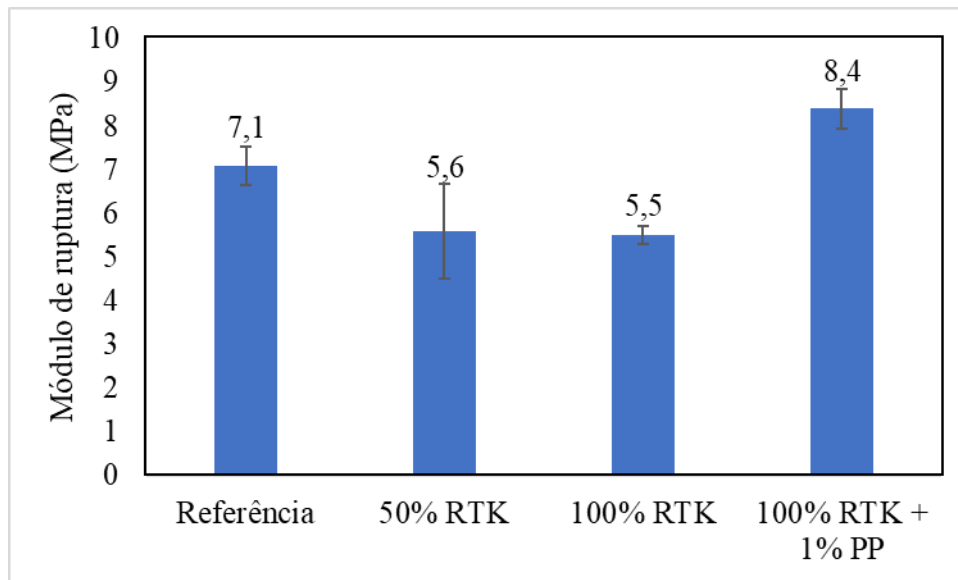
O resultado do módulo de ruptura do painel de referência e o de 100% RTK mais 1% de polipropileno foi próximo ao encontrado na análise de Nasser et al. (2016). A análise encontrou 7,4 MPa para aplicação de resíduo de madeira *Leucaena glauca*, valor próximo ao encontrado no painel de referência. Já os valores aproximados do módulo de ruptura encontrado no painel de 100% RTK mais 1% de polipropileno são 8,1 MPa, 8,4 MPa, 8,6 MPa e 8,6 MPa para os painéis utilizando resíduo de madeira *Pithecellobium dulce*, *Tamarix aphylla*, *Acacia salicina* e *Ficus altissima*, respectivamente.

O estudo de Khorami, Ganjian e Srivastav (2016), que estudaram placas com RTK e polipropileno, obtiveram valores próximos aos encontrados nos painéis de 50% RTK e 100%

RTK. Contudo, o painel 100% RTK mais 1% polipropileno obteve valor maior que o encontrado no estudo. Essa diferença pode ter sido devido o estudo ter utilizado fibras menores, onde elas podem ter se aglomerado mais e conseqüentemente não ter uma mistura homogênea.

A NBR 15498 (ABNT, 2021) diz que o valor mínimo para MOR é de 4 MPa, portanto mesmo que a aplicação do resíduo tenha diminuído a resistência a tração na flexão, os valores encontrados nos painéis de 50% RTK e 100% RTK ainda atenderam a norma. Já os painéis de referência e 100% RTK mais 1% polipropileno além de terem atendido a norma, atingiram a categoria 2 na tabela de requisitos de resistência a flexão.

Figura 10 - Resistência a tração na flexão dos painéis

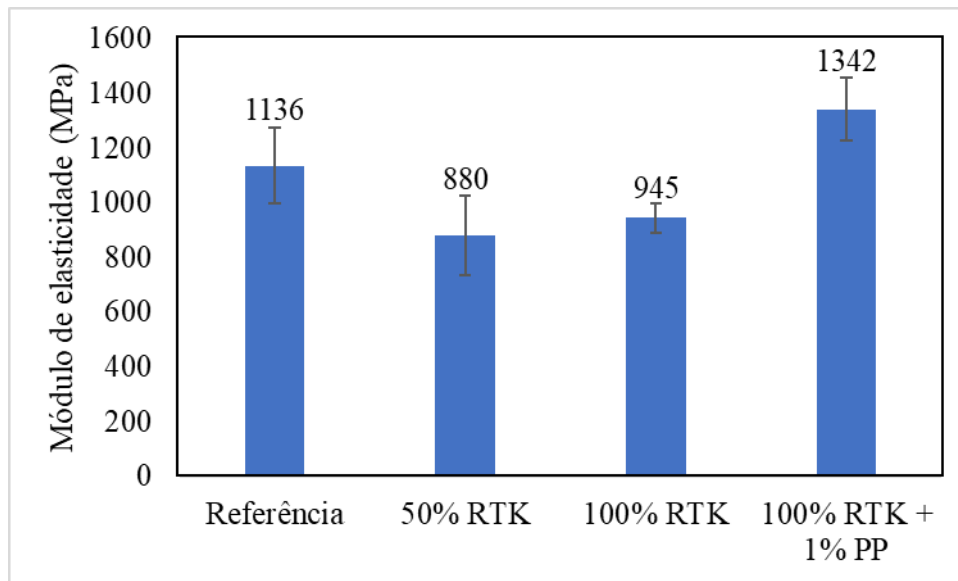


Fonte: Do autor (2024)

Na Figura 11 está apresentado os resultados obtidos de rigidez na tração a flexão dos painéis. Os painéis apresentaram valores de 1136 MPa para referência, 880 MPa para 50% RTK, 945 MPa para 100% RTK e 1342 MPa para 100% RTK mais 1% polipropileno. Os resultados indicam que a adição de RTK reduz a rigidez em comparação com o painel de referência, mas a adição de 1% de polipropileno ao painel com 100% de RTK aumenta significativamente a rigidez, ultrapassando até mesmo o valor do painel de referência.

Na especificação de Bison (2017) o valor mínimo de MOE para painéis é de 3000 Mpa. Os valores de MOE encontrados nos painéis variam entre 880 MPa e 1342 MPa, portanto nenhum painel atendeu a especificação.

Figura 11 - Módulo de elasticidade dos painéis



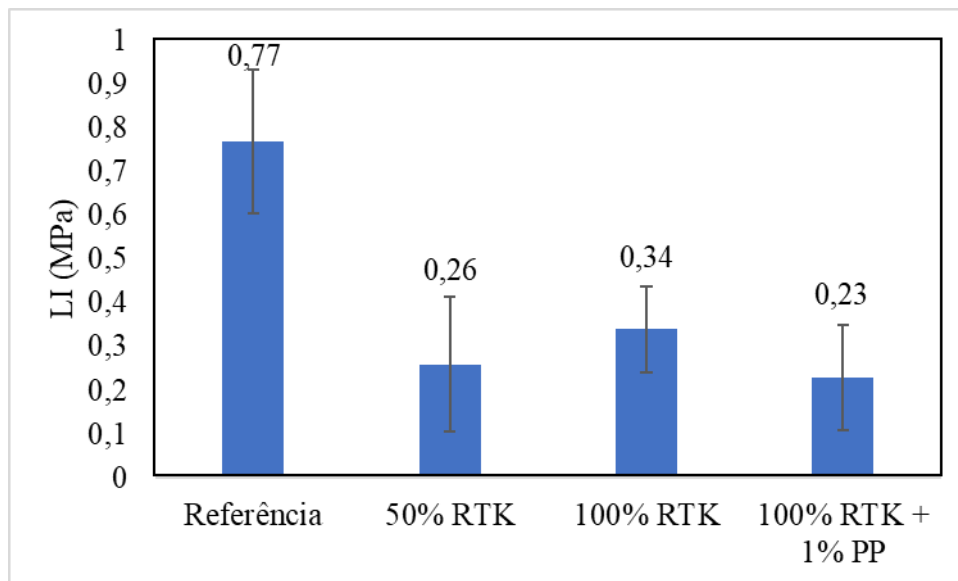
Fonte: Do autor (2024)

A Figura 12 apresenta os resultados encontrados de ligação interna (LI) dos painéis. Os resultados para ligação interna são 0,77 MPa, 0,26 MPa, 0,34 MPa e 0,23 MPa para os painéis de referência, 50% RTK, 100% RTK e 100% RTK mais 1% de polipropileno, respectivamente. É possível notar que com a aplicação de 100% RTK, o valor ligação interna diminuiu 55,85% em relação ao painel de referência. O painel com 100% RTK mais 1% de polipropileno teve um valor menor, comparado aos outros painéis. Isso indica que o RTK e o polipropileno, juntos ou separadamente, não contribuem significativamente para a coesão interna dos painéis comparados ao painel de referência.

Os valores de ligação interna de ambos os painéis foram próximos aos encontrados no estudo de Mendes et al. (2017). O valor do painel de referência foi próximo aos painéis cimentícios que utilizaram *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus urophylla*, onde encontraram valores de 0,70 MPa e 0,72 MPa, respectivamente. Já os valores dos painéis de 50% RTK e 100% RTK mais 1% de polipropileno, foram próximos ao painel com resíduo de *Pinus shavings* que encontraram 0,28 MPa. O painel 100% RTK teve valor próximo ao painel com resíduo de bambu, que encontraram 0,36 MPa.

O processo Bison (2017) determina que o valor mínimo para ligação interna é de 0,40 MPa. Portanto somente o painel de referência atendeu a resistência estabelecida, ultrapassando 92,5% do valor mínimo especificado. Os painéis de 50% RTK, 100% RTK e 100% RTK mais 1% polipropileno não atenderam ao valor mínimo determinado, pois variam somente entre 0,23 MPa e 0,34 MPa.

Figura 12 - Ligação interna dos painéis

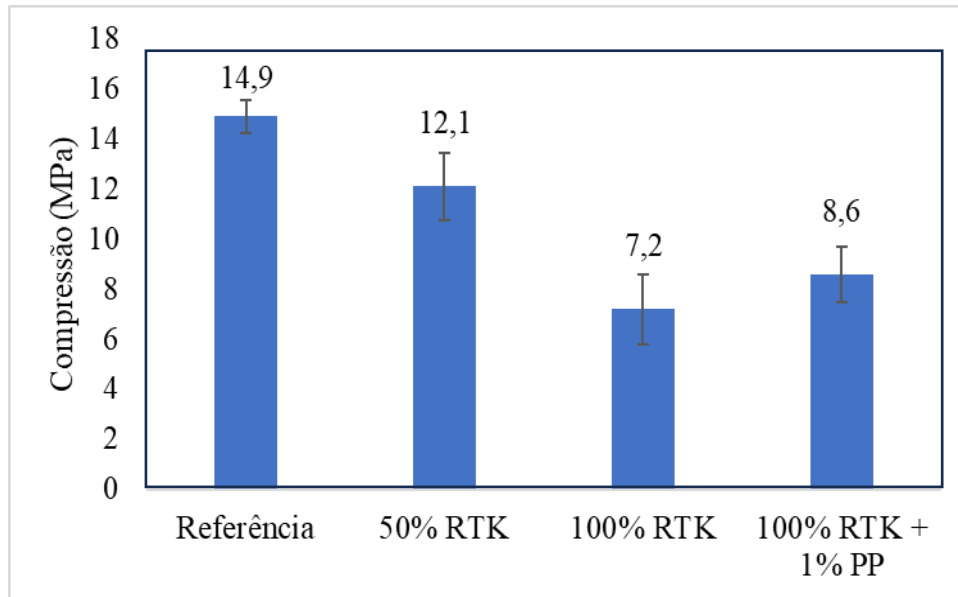


Fonte: Do autor (2024)

A Figura 13 mostra os valores encontrados de resistência a compressão dos painéis. O painel de referência apresentou valor de 14,9 Mpa e os painéis de 50% RTK, 100% RTK e 100% RTK mais 1% polipropileno apresentaram valores de 12,1 MPa, 7,2 MPa e 8,6 MPa, respectivamente. A resistência a compressão diminuiu quando a madeira foi substituída por 50% RTK, tendo uma diferença de 18,79% em relação ao painel de referência. Já com a substituição da madeira em 100% RTK, a resistência a compressão diminuiu 51,68%. Mas com a adição de 1% de polipropileno, apresentou uma pequena melhoria em relação ao painel 100% RTK, aumentando 19,44%. A adição de polipropileno pode ter ajudado a melhorar a resistência à compressão, embora o valor ainda seja inferior ao do painel de referência e do painel com 50% RTK.

O valor da resistência a compressão do painel de 50% RTK foi próximo ao valor encontrado no estudo de Mendes et al. (2017), onde utilizaram resíduos de bambu no painel cimentício, com diferença de apenas 1,3 MPa. Já o painel de referência teve um valor maior, comparado com o mesmo painel do estudo, com diferença de 1,5 MPa.

Figura 13 - Resistência a compressão dos painéis



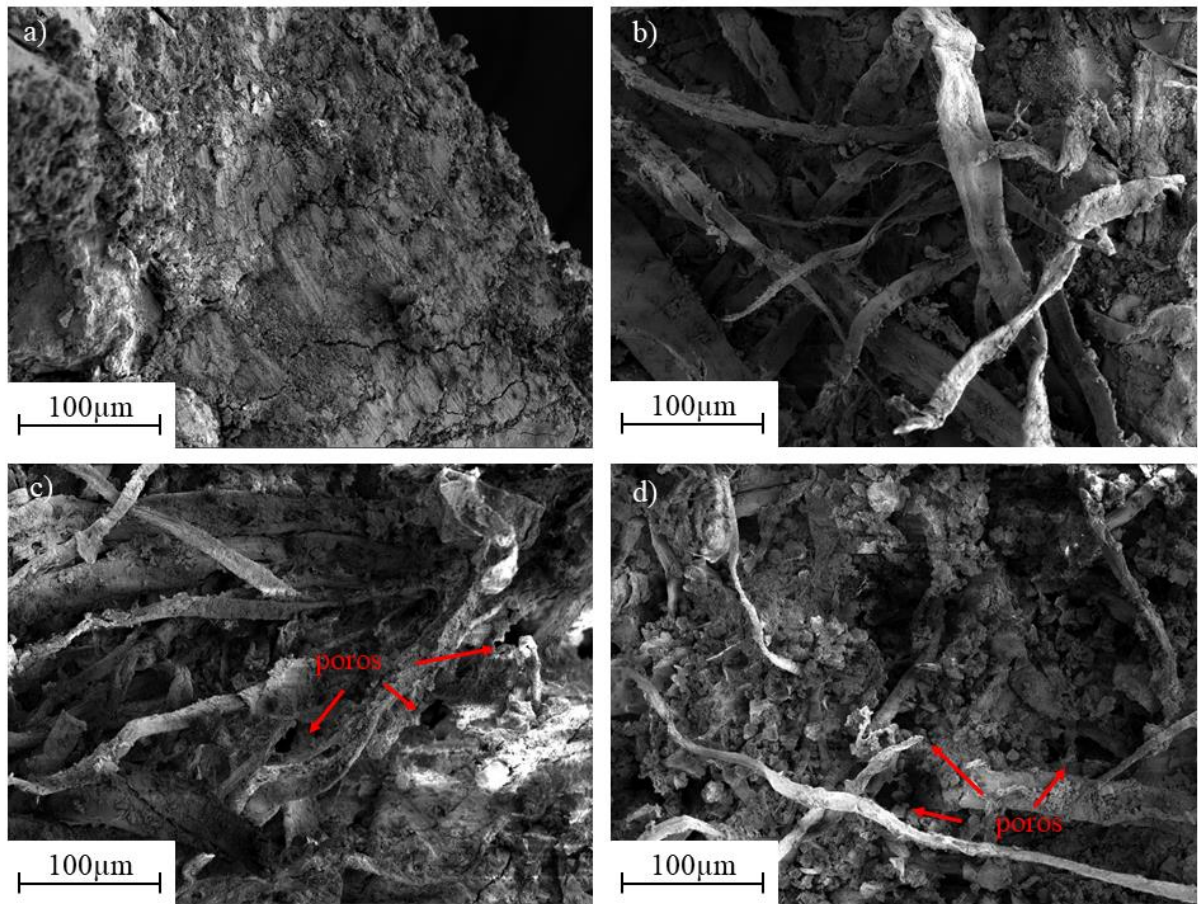
Fonte: Do autor (2024)

### 5.2.3 Caracterização microestrutural

As imagens microestruturais dos painéis seguem apresentadas na Figura 14. Na Figura 14a é possível observar a interação entre fibra e matriz do painel de referência. A Figura 14b mostra uma mistura das fibras de resíduo e madeira e da matriz de cimento do painel 50% RTK. Já a Figura 14c mostra a mistura somente do resíduo e do cimento do painel 100% RTK. A Figura 14d é possível observar maior quantidade de resíduo e cimento e poucas fibras de polipropileno.

Esta análise ajudou a identificar como as diferentes proporções de resíduo e a adição de polipropileno interagem na estrutura do painel. O painel de 100% RTK (Figura 14c) e o painel 100% RTK mais 1% de polipropileno (Figura 14d), através da imagem obtida no MEV, é possível observar maiores quantidades de vazios onde a água pode se acumular ou ser absorvida e conseqüentemente ter ocasionado maior absorção de água nesses painéis em comparação com o painel de referência (Figura 14a).

Figura 14 - MEV dos painéis de: a) referência; b) 50% RTK; c) 100% RTK e d) 100% RTK mais 1% polipropileno



Fonte: Do autor (2024)

## 6 CONCLUSÃO

- A absorção de água dos painéis aumenta conforme o teor de resíduos de tubos de papelão (RTK) na composição. Os painéis de referência, sem RTK, exibiram as menores taxas de absorção de água, tanto em 2 horas quanto em 24 horas. À medida que a porcentagem de RTK aumenta, os valores de absorção de água também sobem, com o painel contendo 100% de RTK e 1% de polipropileno apresentando os maiores índices. Os resultados encontrados indicam que a incorporação de RTK influencia diretamente a capacidade de absorção de água dos painéis, o que deve ser considerado na avaliação de sua aplicação prática.
- Os dados do inchamento em espessura indicam que a incorporação de RTK e polipropileno resulta em um maior inchamento dos painéis, especialmente após 24 horas de imersão, o que pode influenciar na estabilidade dimensional dos painéis ao longo do tempo.
- Nos resultados de resistência de MOR e MOE, embora o uso de RTK possa reduzir a resistência dos painéis, a adição de polipropileno pode compensar essa redução e até mesmo melhorar o desempenho mecânico dos painéis.
- Na ligação interna, o painel de referência apresentou o maior valor, enquanto os painéis contendo RTK exibiram valores inferiores. Os resultados indicam que a substituição parcial ou total de materiais por RTK, assim como a adição de polipropileno, reduz consideravelmente a força de ligação interna dos painéis, o que pode afetar a sua integridade estrutural.
- A resistência à compressão dos painéis diminui com a maior proporção de RTK no material. O painel de referência, que não contém RTK, tem a melhor resistência. A adição de polipropileno em uma pequena quantidade (1%) ao painel 100% RTK melhora um pouco a resistência, mas não compensa totalmente a perda causada pela substituição do material base por RTK.
- Portanto, de acordo com os resultados encontrados, é possível a aplicação de RTK em painéis cimentícios e com isso contribuir para o desenvolvimento sustentável de novos materiais e novas técnicas.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Annual book of **ASTM: D-1037** - Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles. Materials Philadelphia, 2012.
- ARGALIS, P. P. et al. Development of New Bio-Based Building Materials by Utilising Manufacturing Waste. **Environmental and Climate Technologies**, v. 28, n. 1, p. 58–70, 1 jan. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 6 p. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 6 p. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, 4 p. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: madeira - determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 3 p. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14984**: madeira – determinação da densidade aparente de cavacos. Rio de Janeiro, 5 p., 2003.
- BARCELLOS, I. O. et al. Compósitos poliméricos e o meio ambiente: um estudo sobre cargas alternativas e compósitos de polipropileno no século XXI no Brasil / Polymeric composites and the environment: a study on alternative fillers for polypropylene composites in the 21st century in Brazil. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 29399–29421, 22 abr. 2022.
- 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, 7 jun. 2021.
- BISON WOOD-CEMENT BOARD. Technical hand book. **Bison Report**. Berlin, p. 1- 36, 2017.
- BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: J. Wiley, 689 p. 1963.
- CABRAL, M. R. et al. Evaluation of accelerated carbonation curing in cement-bonded balsa particleboard. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 2, 1 abr. 2018.
- CASTRO, V. G. DE. **Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro**. [s.l.] EdUFERSA, 2021.

ÇAVDAR, A. D.; YEL, H.; TORUN, S. B. Microcrystalline cellulose addition effects on the properties of wood cement boards. **Journal of Building Engineering**, v. 48, 1 maio 2022.

DA SILVA, R. V.; CASCUDO, O.; BACARJI, E. Cementitious composites with polypropylene fibers: evaluations in the fresh and hardened state. **Revista Materia**, v. 27, n. 2, 2022.

DO PRADO BANCZEK, E. et al. Morphological and elementary evaluation of wooden carbonaceous materials from activated carbon industry. **Nativa**, v. 7, n. 2, p. 213–217, 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 323**: particleboard specifications. Bruxelas, 2007.

FERNANDA, M. et al. Aplicação de ferramentas da qualidade para minimizar a porcentagem de defeitos em compósitos cimento-madeira. 2023.

GUO, X. et al. Production of recycled cellulose fibers from waste paper via ultrasonic wave processing. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 132, n. 19, 1 maio 2015.

HAIGH, R. et al. A review of the mechanical and durability performance of kraft-fibre reinforced mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 297, 23 ago. 2021.

HAIGH, R. et al. The durability performance of waste cardboard kraft fibre reinforced concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 67, 15 maio 2023.

HAIGH, R. A Decade Review of Research Trends Using Waste Materials in the Building and Construction Industry: A Pathway towards a Circular Economy. **Waste**, v. 1, n. 4, p. 935–959, 20 nov. 2023.

HAIGH, R. et al. Microstructural attributes and physiochemical behaviours of concrete incorporating various synthetic textile and cardboard fibres: A comparative review. **Journal of Building Engineering**, p. 108690, jun. 2024.

HASAN, A.; RABBI, M. S.; MARUF BILLAH, M. Making the lignocellulosic fibers chemically compatible for composite: A comprehensive review. **Cleaner Materials**, v. 4, 1 jun. 2022.

HAWANIS, H. S. N. et al. Insights into lignocellulosic fiber feedstock and its impact on pulp and paper manufacturing: A comprehensive review. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 40, p. e00922, jul. 2024.

IWAKIRI, S. et al. Propriedades tecnológicas de painéis cimento-madeira produzidos com partículas de eucalipto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 14, n. 3, p. 217–223, 24 nov. 2015.

KARIMAH, A. et al. A review on natural fibers for development of eco-friendly bio-composite: characteristics, and utilizations. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 13, p. 2442–2458, 1 jul. 2021.

- KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, E. P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, ellishor wood. **Chichester: E. Horwood**, 1130 p. 1987.
- KHORAMI, M.; GANJIAN, E.; SRIVASTAV, A. **Feasibility Study on Production of Fiber Cement Board Using Waste Kraft Pulp in Corporation with Polypropylene and Acrylic Fibers**. *Materials Today: Proceedings*. **Anais...Elsevier Ltd**, 2016.
- MARQUES, M. L. et al. Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 5, p. 466–472, 1 maio 2016.
- MENDES, R. F. et al. Lignocellulosic residues in cement-bonded panels. Em: **Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**. [s.l.] Elsevier Inc., 2017. p. 3–16.
- MIRANDA, A. J. DE L. et al. Preparation and characterization of wood-cement particleboards produced using metakaolin, calcined ceramics and residues of Pinus spp. **Journal of Building Engineering**, v. 32, 1 nov. 2020.
- NARCISO, C. R. P. et al. Development of iron ore tailings based wood-cement composite panels. **Environmental science and pollution research international**, v. 30, n. 54, p. 115381–115395, 1 nov. 2023.
- NASSER, R. A. et al. Use of tree pruning wastes for manufacturing of wood reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 72, p. 246–256, 1 set. 2016.
- NORMEN FÜR HOLZFASERPLATEN SPANPLATTEN SPERRHOLZ. **DIN 52362**: Testing of wood chipboards bending test, determination of bending strength. Berlin 39-40, 1982.
- OLIVEIRA, F. A. C. et al. Portland cement clinker production using concentrated solar energy – A proof-of-concept approach. **Solar Energy**, v. 183, p. 677–688, 1 maio 2019.
- PAKRAVAN, H. R.; OZBAKKALOGLU, T. Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances. **Construction and Building Materials**, v. 207, p. 491–518, 20 maio 2019.
- PAWDE, S.; CHAUDHARI, S. R.; MATCHE, R. S. Active Packaging for Strawberry and Coriander: A Natural Extract Impregnated Paper. **ACS Food Science and Technology**, 17 maio 2024.
- RANJBAR, N.; ZHANG, M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 107, 1 mar. 2020.
- ROCHA, T. M. S.; MIRANDA, L. F. R. Análise comparativa entre compósitos minerais produzidos com partículas de madeira passante na peneira 1,2 mm. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 2, p. 233–244, 3 jun. 2020.
- RODRÍGUEZ-FABIÀ, S.; CHINGA-CARRASCO, G. Effects of a poly(hydroxyalkanoate) elastomer and kraft pulp fibres on biocomposite properties and three-dimensional (3D)

printability of filaments for fused deposition modelling. **Journal of Bioresources and Bioproducts**, v. 7, n. 3, p. 161–172, 1 ago. 2022.

SALES, D. DE C.; CABRAL, A. E.; MEDEIROS, M. S. Development of fiberboard panels manufactured from reclaimed cement bags. **Journal of Building Engineering**, v. 34, 1 fev. 2021.

SOUZA, M. J. C. DE et al. Wood–cement boards with addition of coconut husk. **Wood Material Science and Engineering**, v. 17, n. 6, p. 617–626, 2022.

TUBOMINAS INDÚSTRIA DE EMBALAGENS EIRELI. **Formas de papelão para pilares em obras de construção civil**. Disponível em: <<https://tubominas.com.br/formas-de-papelao-parapilares-em-obras-de-construcao-civil/>>. Acesso em: 24 jun. 2024.

VEGA VILLARRUEL, D. C. et al. Evaluation of the addition of wheat residues in the production of Pinus oocarpa agglomerated panels. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25, n. 5, p. 1753–1760, 1 jul. 2023.

VIVIAN, M. A.; MODES, K. S.; CAETANO, A. P. Potential of pinus glabra wood for pulp production. **Madera y Bosques**, v. 26, n. 3, p. 1–13, 2020.

YANG, J. et al. Constitutive relationships and acoustic emission behavior of plant-fiber/magnesium oxychloride cement composites under uniaxial compressive load. **Construction and Building Materials**, v. 404, 10 nov. 2023.