



**LÚCIA MARIA JOAQUIM ASSANE**

**PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS FIBROCIMENTOS  
UTILIZANDO COMO REFORÇO PARTÍCULAS DE  
MADEIRA DE *ERYTRHYNA POEPPIGIANA***

**LAVRAS - MG  
2024**

**LÚCIA MARIA JOAQUIM ASSANE**

**PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS FIBROCIMENTOS UTILIZANDO COMO  
REFORÇO PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *ERYTHRHYNA POEPPIGIANA***

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Tecnologia da Madeira,  
para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes  
Orientador

Dr. Lorrان de Sousa Arantes  
Co-orientador

**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).

Assane, Lucia Maria Joaquim.

Produção De Compósitos Fibrocimentos Utilizando Como  
Reforço Partículas De Madeira De *Erythyna Poeppigiana* / Lucia  
Maria Joaquim Assane. - 2024.

53 p.

Orientador(a): Lourival Marin Mendes.

Coorientador(a): Lorrان De Sousa Arantes.

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

Bibliografia.

1. : Material lignocelulósico. 2. sulfato de alumínio. 3.  
*Erythyna poeppigiana*. I. Mendes, Lourival Marin. II. Arantes,  
Lorrان De Sousa. III. Título.

**LÚCIA MARIA JOAQUIM ASSANE**

**PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS FIBROCIMENTOS UTILIZANDO COMO  
REFORÇO PARTÍCULAS DE MADEIRA DE *ERYTRHYNA POEPPIGIANA***

**PRODUCTION OF FIBER CEMENT COMPOSITES USING *ERYTRHYNA*  
*POEPPIGIANA* WOOD PARTICLES AS REINFORCEMENT**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Tecnologia da Madeira,  
para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 16 de Agosto de 2024  
Dr. Lourival Marin Mendes UFLA  
Dr. José Benedito Guimarães Junior UFLA  
Dr<sup>a</sup>. Cinthia Aparecida Silva UFG  
Dr. Lorrان de Sousa Arantes UFLA

Prof. Dr. Lourival Marin Mendes  
Orientador

Dr. Lorrان de Sousa Arantes  
Co-orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

*Às minhas queridas sobrinhas,  
Khaynara, Wesliny, Darshella Shanayah, Sarah, Wendy Dayanne*

*Vocês são a luz que ilumina os meus dias, com a vossa alegria, curiosidade e inocência. Esta dissertação é dedicada a vocês, que me inspirem a ser sempre melhor e a nunca desistir dos meus sonhos. Que cresçamos sempre com a certeza de que, com determinação e amor, tudo é possível. Que este trabalho vos sirva de exemplo de que o conhecimento é uma das maiores*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A presente Dissertação, corresponde a concretização de uma das etapas muito importantes da minha vida. Desta feita, endereço os meus agradecimentos para as pessoas que acompanharam e apoiaram-me durante o meu percurso académico.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela vida, saúde, amor, que ele me concedeu e por ter-me dado as condições necessárias para fazer o curso e a minha dissertação.

Em segundo lugar, agradeço ao meu Papai/Orientador Lourival Marin Mendes, pela disponibilidade, incentivo, apoio que me concedeu, e pela sua orientação durante o desenvolvimento do trabalho.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao meu co-orientador Lorrán de Sousa Arantes pelo apoio e orientação inestimáveis ao longo desta jornada. Agradeço especialmente pelos ensinamentos compartilhados e por nunca ter me deixado desamparada. Sua dedicação foi fundamental para a realização deste trabalho.

A toda minha família Joaquim Assane, Amélia João, Argentina Assane, Sandra Assane, Piedade Assane, Thiter Assane, pelo amor incondicional, apoio e incentivo intenso para com os meus estudos.

Nesta onda, agradeço ao meu Parceiro Issufo Mecerão pelos momentos inesquecíveis juntos e pela paciência de sempre comigo.

Meus profundos agradecimentos vão também ao Coordenador do programa Paulo Hein ao corpo docente nomeadamente José Reinaldo, José Benedito, Fábio Akira, Saulo Rocha, que fizeram parte do meu crescimento académico.

Aos meus Orientados de Iniciação Científica em especial a Ana Beatriz, aos meus colegas, pela força, ajuda que me deram durante os meus estudos.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciências Florestais, pela oportunidade concedida na realização deste Mestrado. Aos órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG.

*“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez” (Albert Einstein)*

## RESUMO

A utilização de materiais lignocelulósicos como reforço em compósitos cimentícios é uma área de pesquisa amplamente explorada, visando melhorar as propriedades mecânicas e funcionais dos mesmos. No entanto apesar dos avanços significativos nesta área, ainda existem lacunas de conhecimento em relação a certos materiais lignocelulosicos que têm potencial para serem utilizados como reforço. Um exemplo disso é a *Erythrina*, uma espécie florestal com propriedades promissoras que ainda não foram investigadas em sua aplicação como reforço em materiais compósitos. Neste contexto, o objetivo desse estudo será avaliar o desempenho de partículas de *Erythrina poeppigiana* tratadas com sulfato de alumínio em compósitos cimentícios submetidos a carbonatação acelerada. As partículas passaram por um processo de mineralização controlada com 9% de  $Al_2(SO_4)_3$ . Para a produção dos fibrocimentos foram utilizados cimento Portland CPV-ARI, calcário agrícola, 5% de partículas, além dos aditivos: (HPMC) e (ADVA). Os corpos de prova foram produzidos pelo processo de extrusão. Após 3 dias de cura os fibrocimentos foram submetidos à carbonatação acelerada por um período de 24h. Os fibrocimentos foram caracterizados quanto às propriedades físicas (densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente) e mecânicas (módulo de ruptura, módulo de elasticidade e tenacidade) em flexão estática após 28 dias de cura. Foram abordadas as análises (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar a interação entre os materiais constituintes. Os resultados obtidos mostraram que o tratamento com sulfato de alumínio melhorou a interface matriz/partícula. Aumentou a densidade aparente, diminuiu a porosidade, absorção de água, houve um aumento nos valores de MOE, MOR, e Tenacidade, as imagens do MEV comprovaram os resultados físicos. Não foram apresentadas as diferenças estatísticas significativas para as propriedades físicas e mecânicas.

**Palavras-chave:** Material lignocelulósico; sulfato de alumínio; *Erythrina poeppigiana*.

## ABSTRACT

The use of lignocellulosic materials such as reinforcement in cementitious composites is a widely exploited area of research, aiming to improve the mechanical and functional properties of them. However despite significant advances in this area, there are still knowledge gaps in relation to certain lignocellulosic materials that have the potential to be used as a reinforcement. An example of this is *Erythrina*, a forest species with promising properties that have not yet been investigated in its application as a reinforcement in composite materials. In this context, the aim of that study will be to evaluate the performance of *Erythrina poeppigiana* particles treated with aluminum sulfate in cementitious composites undergoing accelerated carbonation. Particles went through a controlled mineralization process with 9%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ . For the production of the fibroments Portland CPV-ARI cement, agricultural limestone, 5% particles, in addition to additives: (HPMC) and (ADVA) were used. Proof bodies were produced by the extrusion process. After 3 days of healing fibroments were subjected to accelerated carbonation for a period of 24h. Fibroments were characterized for physical properties (apparent density, water absorption, and apparent porosity) and mechanical (display module, elastic modulus and tenacity) in static flexion after 28 days of curing. Analyzes (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM) were addressed to verify the interaction between constituent materials. The results obtained showed that aluminum sulphate treatment improved the matrix/particle interface. It increased the apparent density, decreased porosity, water absorption, there was an increase in the values of MOE, MOR, and Tenacity, the images of the SEM proved the physical results. Significant statistical differences for the physical and mechanical properties were not presented.

Keywords: Lignocellulosic material; aluminum sulfate; *Erythrina poeppigiana*.

## INDICADORES DE IMPACTO

O estudo sobre partículas de *Erythrina poeppigiana* tratadas com sulfato de alumínio em compósitos cimentícios, avaliadas sob carbonatação acelerada, apresenta impactos significativos em várias áreas. Tecnicamente, melhora a interface matriz-partícula, resultando em produtos mais eficientes e duráveis. Economicamente, pode reduzir custos através do uso de um material natural e acessível, beneficiando a indústria e comunidades locais. Ambientalmente, promove a sustentabilidade ao explorar um recurso renovável, reduzindo a dependência de materiais sintéticos e contribuindo para práticas mais ecológicas na construção civil. Socialmente, pode estimular o desenvolvimento regional e a criação de empregos, além de enriquecer o conhecimento técnico e apoiar a formação de profissionais. Em relação à Política Nacional de Extensão, o estudo alinha-se com Educação e Formação, Meio Ambiente, e Tecnologia e Inovação, integrando conhecimento acadêmico com aplicações práticas. Adicionalmente, contribui para os ODS 9 (inovação industrial), 12 (consumo responsável), 13 (ação climática) e 15 (uso sustentável dos recursos terrestres).

## IMPACT INDICATORS

The study on *Erythrina poeppigiana* particles treated with aluminum sulfate in cementitious composites, evaluated under accelerated carbonation, presents significant impacts in several areas. Technologically, it improves the matrix-particle interface, resulting in more efficient and durable products. Economically, it can reduce costs through the use of a natural and accessible material, benefiting the industry and local communities. Environmentally, it promotes sustainability by exploring a renewable resource, reducing dependence on synthetic materials and contributing to more environmentally friendly practices in civil construction. Socially, it can stimulate regional development and job creation, in addition to enriching technical knowledge and supporting the training of professionals. Regarding the National Extension Policy, the study is aligned with Education and Training, Environment, and Technology and Innovation, integrating academic knowledge with practical applications. Additionally, it contributes to ODS 9 (industrial innovation), 12 (responsible consumption), 13 (climate action) and 15 (sustainable use of land resources).\

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Fibrocimento.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Processo de Extrusão de Fibrocimento.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 Fibras Vegetais Como Reforço em Matrizes Cimentícias.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4 Carbonatação Acelerada.....</b>	<b>19</b>
<b>4. COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>22</b>
<b>ARTIGO 1- EFEITO DO TRATAMENTO COM SULFATO DE ALUMÍNIO E DA CARBONATAÇÃO ACELERADA EM FIBROCIMENTO EXTRUDADO COM PARTÍCULAS DE MADEIRA DE ERITHRYNA POEPPIGIANA .....</b>	<b>25</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>26</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Obtenção do material .....</b>	<b>27</b>
<b>2.1 Caracterização do material.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2 Mineralização das partículas .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3 Produção dos compósitos .....</b>	<b>28</b>
<b>2.4 Carbonatação Acelerada.....</b>	<b>29</b>
<b>2.5 Propriedades físicas dos compósitos.....</b>	<b>30</b>
<b>2.6 Propriedades mecânicas dos compósitos por flexão .....</b>	<b>30</b>
<b>2.7 Ensaio de condutividade térmica dos compósitos .....</b>	<b>30</b>

2.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	31
2.9 Permeabilidade ao ar .....	32
2.10 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com transformada de fourier (FTIR) do compósito .....	32
2.11 Análise de dados.....	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
3.1 Caracterização química da partícula de <i>Erithryna Poeppigiana</i> .....	34
3.2 Propriedades Físicas dos compósitos.....	35
3.2.1 Densidade Aparente .....	35
3.2.2 Porosidade aparente .....	36
3.2.3 Absorção de Água .....	37
3.3 Propriedades Mecânicas dos compósitos.....	38
3.3.1 Módulo de Elasticidade.....	38
3.3.2 Modulo de Ruptura .....	39
3.3.3 Tenacidade .....	40
3.4 Análise de MEV .....	41
3.5 Permeabilidade ao ar.....	42
3.6 Condutividade térmica .....	44
3.7 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com transformada de fourier (FTIR) do compósito .....	45
3. CONCLUSÃO .....	47
REFERÊNCIAS.....	49

## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais de origem cimentícia apresentam baixa tenacidade, resultando assim em fratura ou mesmo fissuras quando estes são submetidos a elevadas cargas ou vibrações (MEYER; WEI, 2015). Para contornar este problema houve a necessidade de estudos de inclusão de fibras nas matrizes cimentícias, agindo como reforço para melhoria na capacidade de absorção de energia do compósito. A inserção de fibras proporciona à matriz cimentícia aumento da resistência à flexão e ao impacto, tenacidade, reduz a massa do compósito, melhoram a retração plástica (HASSAN; SOROUSHIAH; WON, 2012). O primeiro material de construção fibro-reforçado produzido industrialmente foi o cimento-amianto, que apresentava excelente resistência física e mecânica, bom comportamento térmico e acústico, baixo custo e alta durabilidade. Porém, a extração e utilização do amianto estão ligadas a doenças pulmonares graves, incluindo câncer e asbestose, prejudicando os envolvidos no processamento e transporte deste mineral (BALATINECZ; MACVICAR; MATUANA, 1999).

A utilização dessas fibras vegetais é atribuída, além do menor custo, ao fato de serem originárias de fontes renováveis, não serem tóxicas, serem isolantes, apresentarem boa relação massa-resistência e serem amplamente disponíveis, principalmente no Brasil, que se destaca como um dos maiores produtores mundiais de fibras vegetais (AKERS; COOKE; MORTON, 2010; BENTCHIKOU *et al.*, 2012; FARRAPO *et al.*, 2017; TONOLI *et al.*, 2007).

A *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O. F. Cook é uma árvore pertencente à família Leguminosae (Papilionoideae). É frequentemente encontrada em plantações de cacau devido à sua natureza decídua e destaca-se pelo seu potencial paisagístico, especialmente devido à beleza de suas flores. No entanto, há uma escassez de estudos abordando essa espécie em detalhe.

Devido à fraca interação da fibra com o cimento em algumas circunstâncias, os materiais lignocelulósicos em compósitos à base de cimento podem não ser compatíveis com a matriz. A eficácia de um material reforçado com fibra pode ser avaliada com base em alguns critérios-chave, como a resistência do material ao desgaste ou a tenacidade em relação ao tecido, ambos altamente dependentes do grau de adesão entre a fibra e o tecido (FRIENDENBERG; LEMOS, 2019). Nesse sentido, a mineralização é empregada

com o intuito de proteger as fibras contra a ação do ambiente alcalino proporcionado pela matriz cimentícia.

A deterioração ao longo do tempo do material lignocelulósico devido à natureza alcalina do cimento representa uma preocupação. Nesse sentido, a mineralização é empregada com o intuito de proteger as fibras contra a ação do ambiente alcalino proporcionado pela matriz cimentícia. Esse processo visa imobilizar a matéria orgânica presente superficialmente nas fibras, reduzindo sua suscetibilidade à absorção de água e, conseqüentemente, prevenindo possíveis variações dimensionais (FREIRE; SARMIENTO, 1996). Quando empregado como agente mineralizante, o sulfato de alumínio tem a capacidade de inibir a liberação de açúcar proveniente dos agregados orgânicos, resultando na redução da higroscopicidade e da absorção de água (BOLTRYK; PAWLUCZUK, 2013). Adicionalmente, a mineralização dos agregados promove uma melhoria na aderência entre o agregado e o cimento (BOLTRYK; MALASZKIEWICZ, 2008).

O uso de máquinas simples para produção contínua, o alinhamento parcial das fibras e a possibilidade de empregar água ou cimento sob baixa pressão tornam a extrusão um método eficaz e alternativo para fabricar esses materiais compósitos. Esses fatores contribuem para uma maior compactação do compósito e, como resultado, aumentam a resistência à fadiga provocada pelo envelhecimento (RAABE, 2019; SANTOS et al., 2015; TONOLI et al., 2007).

A carbonatação acelerada é uma tecnologia promissora para aprimorar a qualidade de compósitos. Essencialmente, a carbonatação ocorre quando o CO<sub>2</sub> atmosférico se dispersa pelo vapor de água presente nos poros da matriz cimentícia (RAABE et al., 2019).

Desta forma, o presente estudo sugeriu o emprego de partículas da madeira de *Erithryna poeppigiana* na produção de fibrocimento. O propósito foi encontrar uma alternativa viável de aproveitamento, com a intenção de valorizar a madeira tendo em vista que a madeira desse gênero não apresenta as qualidades ideais para ser utilizada como madeira sólida.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

- ✓ Analisar os impactos nas características físicas, mecânicas e microestruturais de compósitos de fibrocimentos produzidos a partir de partículas de *Eritryna poeppigiana* mineralizadas com sulfato de alumínio  $Al_2(SO_4)_3$  e submetidas posteriormente a carbonatação acelerada.

### 2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Utilizar técnicas como microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar as mudanças microestruturais nos compósitos devido ao tratamento com sulfato de alumínio e carbonatação;
- ✓ Comparar o desempenho dos compósitos reforçados com partículas de *Erythrina poeppigiana* não tratadas, tratadas, e tratadas e carbonatadas para identificar a abordagem mais eficaz;
- ✓ Analisar as propriedades químicas das partículas de madeira de *Erythrina poeppigiana* antes e após o tratamento com sulfato de alumínio.

### **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **3.1 Fibrocimento**

O fibrocimento é um material de construção composto principalmente de cimento, fibras (sendo elas vegetais, sintéticas, minerais), água e outros aditivos. É reconhecido por sua resistência e durabilidade, além de ser amplamente utilizado em diversas aplicações na construção civil. Um dos principais motivos desse material ser desenvolvido, foi devido a necessidade de reduzir as fissurações dos materiais cimentícios, uma vez que a matriz cimentícia apresenta comportamento mecânico frágil (LIMA *et al.*, 2007). O amianto possui bom comportamento mecânico, foi a fibra selecionada para fortalecer o compósito cimentício em escala industrial (COUTTS, 2005).

A extração e utilização desse mineral estão ligadas a doenças pulmonares, como o câncer e asbestose, prejudicando quem está diretamente envolvido no processamento e transporte desse mineral. E isso fez com que o amianto fosse abolido em vários países (COUTTS, 2005).

O método mais prevalente na fabricação de fibrocimento é o processo Hatschek, concebido por Ludwig Hatschek no final do século XIX, com base em técnicas de produção de papel. Desde então, esse processo tem sido continuamente aprimorado para atingir elevada produção e melhor desempenho sem comprometer seu princípio fundamental: a filtragem de uma suspensão diluída de cimento na tela de um cilindro rotativo (IKAI *et al.* 2010). Conforme descrito por Mendes (2014), no processo Hatschek, uma mistura diluída de fibras, cimento Portland e aditivos é preparada em um tanque, submetida a prensagem e, em seguida, passa por um processo de cura.

A composição do fibrocimento tem experimentado mudanças contínuas devido a introdução de novos aditivos químicos e minerais, cimentos com propriedades inovadoras, bem como diferentes tipos de fibras sintéticas e vegetais. Em muitos casos, essas alterações podem tornar impraticável a produção pelo processo Hatschek (RAJABIPOUR, 2018).

#### **3.2 Processo de Extrusão de Fibrocimento**

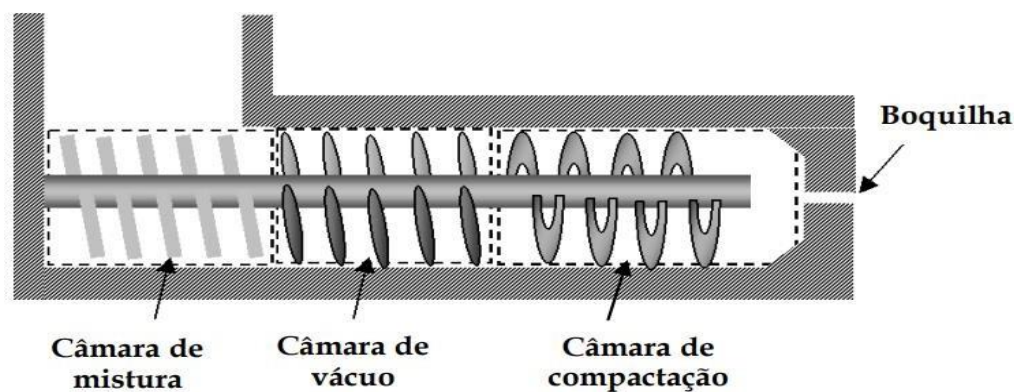
Na esfera industrial, a extrusão desempenha um papel significativo na moldagem de materiais, a abordagem contínua proporciona níveis elevados de eficiência produtiva e uma extensa diversidade geométrica nos produtos finais. No entanto, é notável que na

indústria cimentícia, o interesse e as pesquisas sobre esse processo começaram a surgir apenas nos últimos anos (ALFANI; GUERRINI, 2005).

A técnica de extrusão envolve a compressão de um material por meio de uma abertura, resultando no fluxo do material que adquire a forma geométrica desejada ao passar pela boquilha. A configuração do material é determinada pelo formato específico da boquilha (SOTO, 2010).

Existem duas categorias principais de extrusora: aquelas que utilizam pistão e aquelas que empregam uma rosca. Uma distinção significativa entre esses dois métodos de extrusão é que o uso de pistão ocorre de maneira intermitente, enquanto o método de rosca opera de forma contínua, conferindo-lhe uma maior produtividade. A extrusora de rosca pode ser fabricada com a adição de uma câmara de vácuo, visando diminuir a porosidade na mistura a ser extrudada. O esquema de uma extrusora, conforme descrito por Soto (2010), é ilustrado na figura 1, destacando a câmara de mistura - onde a homogeneização da mistura ocorre; a câmara de vácuo; câmara de compactação - responsável pela compactação da matriz cimentícia; e a boquilha - desempenhando o papel crucial de dar forma ao produto pela compactação da mistura.

**Figura 1:** Partes constituintes de uma extrusora



Fonte: Soto (2010)

De acordo com Shao (1995), elementos cruciais para o desempenho da extrusora incluem a geometria da rosca, as dimensões das sessões de alimentação e compactação. A boquilha desempenha um papel essencial ao proporcionar a compactação final da mistura e determinar a geometria da seção transversal do produto extrudado. É de importância manter uma velocidade de extrusão constante para assegurar um fluxo

uniforme da mistura, evitando a geração de gradientes de tensão durante o processo de saída pela boquilha (CHEN; MURAKAMI, 2000).

O método de extrusão, de acordo com Teixeira *et al.* (2012), é caracterizado por sua natureza contínua, conferindo vantagens notáveis à produção industrial do fibrocimento. Além disso, proporciona uma ampla diversidade de seções transversais para os produtos extrudados (BRIDGAWATER; BURBIDGE; SARACEVIC, 1995).

Outras vantagens associadas ao processo de extrusão incluem a utilização de máquinas mais simples para uma produção contínua, resultando em menor geração de resíduos líquidos e sólidos (FONSECA, 2016).

Em um estudo de Perreira 2021, foi realizado um processo de extrusão somente com fibrocimento composto por 100% de quartzito, os quais foram submetidos ao processo de carbonatação acelerada (0, 6, 12 e 24h). Não houve diferença estatisticamente significativa na densidade aparente dos compósitos expostos a diferentes tempos de carbonatação, no entanto, porosidade aparente diminuiu em até 6% em 12 horas de exposição. A absorção de água diminuiu em 8,74% após 6 horas de carbonatação. Quanto ao módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e limite de proporcionalidade (LOP), não houve diferença estatística entre os compósitos não carbonatados (controle) e aqueles submetidos à carbonatação acelerada em diferentes períodos Perreira, (2021).

Adicionalmente, a extrusão é empregada quando há a necessidade de baixas relações entre água e cimento, reduzindo a concentração de água e produtos alcalinos de hidratação do cimento ao redor das fibras, promovendo assim uma maior compactação do compósito gerado. Esta compactação, por sua vez, pode resultar em produtos mais resistentes para enfrentar situações de fadiga geradas durante o envelhecimento do compósito (NAKAGAITO *et al.*, 2009).

Entretanto, alguns aspectos ainda carecem de esclarecimento, como a evolução do comportamento mecânico dos compósitos ao longo do tempo, a relação entre o tipo de reforço e a durabilidade dos compósitos, as variáveis do processo de extrusão, as matérias-primas empregadas e a possibilidade de melhorar a dispersão do material de reforço quando são utilizadas fibras celulósicas.

### 3.3 Fibras Vegetais Como Reforço em Matrizes Cimentícias

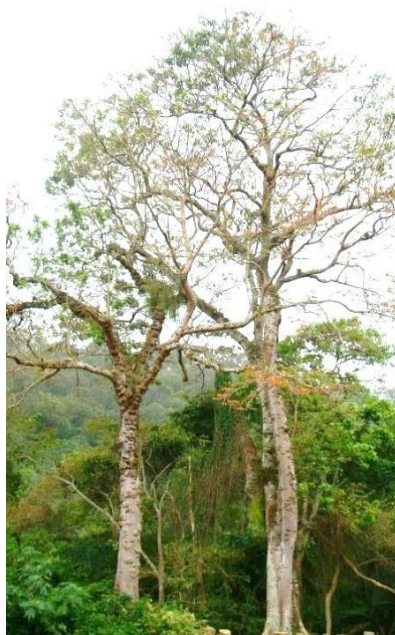
A utilização de fibras como reforço em matrizes cimentícias é uma prática comum na indústria da construção civil, melhora as propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais. A adição de fibras ao compósito contribui para fortalecê-lo. Isso ocorre porque as fibras melhoram a capacidade de absorção de energia distribuindo as microfissuras ao longo do compósito cimentício FARRAPO *et al.* (2017).

Além de sua abundância, outra razão para empregar esse material como reforço em matriz cimentícias é sua baixa massa específica. Isso possibilita a construção de estruturas de concreto mais leve, conforme indicando por ESMERALDO (2006).

A utilização de fibras vegetais traz benefícios significativos em termos de sustentabilidade, uma vez que são provenientes de fontes renováveis, de baixo custo e amplamente disponíveis em todo mundo. No entanto, para viabilizar o uso dessas fibras, são necessários tratamentos para melhorar sua durabilidade, como o uso de hidróxido de cálcio, entre outros SANTOS *et al.* (2022).

A *Erythrina poeppigiana* é uma espécie arbórea pertencente à família Fabaceae (Papilionoideae). É consorciada em plantações de cacau por ser uma espécie caducifólia e possui potencial paisagístico devido a exuberância das flores (ROVEDA *et al.*, 2021), mas com carências em relação a trabalhos que abordem o conhecimento tecnológico dessa madeira. A *Erythrina* é uma espécie exótica que não apresenta boa qualidade quando utilizada como madeira sólida.

MEJIA-BALLESTEROS *et al.* (2023) trataram a partícula de pinus pelo processo de hornificação e os resultados indicaram que diminuiu a capacidade de absorção de água e aumentou a estabilidade dimensional da polpa de celulose.

Figura 2: *Erythrina poeppigiana*

Fonte: Flora e funga do Brasil (2024)

### 3.4 Carbonatação Acelerada

A carbonatação acelerada é um processo que consiste em expor um material cimentício como o concreto ou compósitos cimentícios, a altas concentrações de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em um curto período. Esse processo envolve a interação dos subprodutos gerados pela hidratação do cimento com o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Ao longo do tempo, o cimento absorve o  $\text{CO}_2$  da atmosfera, um fenômeno que ocorre tanto durante a vida útil da estrutura como após a sua demolição (FILOMENO *et al.*, 2020).

Uma pesquisa realizada por CHOI e MOON (2019), revelou que a pasta de cimento, quando contém escoria, apresenta um aumento na resistência após o processo de carbonatação. Antes da exposição ao  $\text{CO}_2$ , a resistência a extensão da pasta era de 15,6 MPa, enquanto após a carbonatação, a resistência aumentou para 30,1 MPa, representando uma melhoria de 92,95% em comparação com a cura sem  $\text{CO}_2$ . Esses resultados destacam o potencial da técnica de carbonatação para aprimorar as propriedades mecânicas dos compósitos.

Uma pesquisa realizada por TERRA (2023), observou que houve melhoria significativa para as propriedades de tenacidade para os fibrocimentos submetidos a maiores períodos de carbonatação acelerada, com tendência à estabilização desta propriedade entre 9 horas e 12 horas.

A carbonatação acelerada de materiais a base de cimento representa um método racional e eficaz para a preparação de materiais de construção. Especificamente trata-se de um procedimento inovador de cura destinado a unidades de concreto pré-moldadas. Esse método resulta no sequestro de dióxido de carbono, convertendo-o em produtos e contribuindo para redução das emissões de CO<sub>2</sub> na indústria da construção. Em compósitos reforçados com fibras vegetais, a carbonatação da matriz é intensificada devido à sua elevada porosidade, o que facilita a penetração do CO<sub>2</sub>. A formação de carbonato de cálcio dentro do material pode ocorrer, dependendo do tipo de cimento utilizado. Essa formação de carbonato de cálcio leva a redução da alcalinidade do meio, resultando em uma diminuição do pH e, como consequência cria um ambiente menos agressivo para as fibras, conforme apresentado por Pereira (2021).

De acordo com o estudo de TONOLI *et al.* (2019), após 10 horas de carbonatação acelerada, observou-se um aumento de CaCO<sub>3</sub>, juntamente com um incremento nas propriedades mecânicas. WANG *et al.* (2019) também constataram, em sua pesquisa sobre carbonatação acelerada de pastas de cimento endurecidas, uma melhoria na resistência à compressão dos corpos de prova após o processo. Essa reação foi notada principalmente nas primeiras 6 horas do processo acelerado de carbonatação.

#### 4. COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O referencial teórico abordou aspectos relevantes da produção de fibrocimento por extrusão, incluindo a incorporação de partículas de *Erithryna* como reforço, bem como o impacto do processo de carbonatação acelerada e o uso de aditivos nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do compósito.

No referencial, também foi abordado como as investigações sobre carbonatação acelerada têm crescido em importância na preparação de materiais compósitos para construção, permitindo a redução da alcalinidade da matriz e, conseqüentemente, criando um ambiente menos corrosivo para as fibras de reforço.

Neste contexto, há escassez de informações sobre o uso da madeira de *Erithryna* como reforço em compósitos cimentícios. Assim, há uma necessidade premente de desenvolver mais estudos futuros sobre a incorporação de partículas de *Erithryna*, a fim de tornar este material verdadeiramente viável para aplicação na indústria.

## REFERÊNCIAS

- ALFANI, R.; GUERRINI, G. L. Rheological test methods for the characterization of extrudable cement-based materials: a review. **Materials and Structures**, London, v. 38, n. 2, p. 239-247, Mar. 2005.
- BENTCHIKOU, M. *et al.* Effect of recycled cellulose fibres on the properties of lightweight cement composite matrix. **Construction and Building Materials**, Guildford, v.34, p. 451-456, 2012.
- BOLTRYK, M.; PAWLUCZUK, E. **Properties of a lightweight cement composite with an ecological organic filler**: Construction and Building Materials. 51, p.97–105. 2013.
- BURBIDGE, A. S.; BRIDGWATER, J.; SARACEVIC, C. Liquid migration in paste extrusion. **Chemical Engineering Research and Design**, London, v. 73, n. 2, p. 810- 816, Aug. 1995.
- CHEN, Z. C.; MURAKAMI, K. I. T. **Effect of particle packing on extrusion behavior of paste**: Journal of Materials Science, New York, v. 35, n. 1, p. 5301-5307, Oct. 2000.
- COUTTS, R. S. P. **A review of Australian research into natural fibre cement composites**: Cement and Concrete Composites, Barking, v. 27, n. 5, p.518-526, May 2005.
- ESMERALDO, A. M. **Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Química Orgânica e Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.
- FARRAPO, C. L. *et al.* **Cellulose associated with pet bottle waste in cement based composites**: Materials Research, São Carlos, v. 20 n.5, p. 1380-1387, 2017.
- FILOMENO, R. H. *et al.* **Optimizing the modified atmosphere parameters in the carbonation process for improved fiber-cement performance**. Journal of Building Engineering, v. 32, 2020.
- FONSECA, Camila Soares. **Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com fibras e nanofibrilas de juta**. Lavras: UFLA, 2016. 126 p.

LIMA, Ana Carla Bezerra De. **Efeito da modificação térmica nas propriedades da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

LIMA, P. R. L. *et al.* **Caracterização mecânica de laminados cimentícios esbeltos reforçados com fibras de sisal**: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 644-651, nov. 2007.

MACVICAR, R.; MATUANA, L. M.; BALATINECZ, J. J. Aging mechanism in cellulose fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, Barking, v. 21, n. 3, p. 189-96, Apr. 1999.

MAŁASZKIEWICZ, D.; BOŁTRYK, M. Optimisation of composition of lightweight concrete with organic filler in the form of *Phragmites australis* reed. Role for concrete in global development. **Proceedings of the International Conference**, Dundee, Scotland, UK, 481–490. 2008.

MOON, E. J., & CHOI, Y. C. Carbon dioxide fixation via accelerated carbonation of cement-based materials: Potential for construction materials applications. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 199, p. 676-687, 2019.

NAKAGAITO, A. N. *et al.* Production of microfibrillated cellulose (MFC) -reinforced polylactic acid (PLA) nanocomposites from sheets obtained by a papermaking-like process. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 69, n. 7/8, p. 1293-1297, June 2009.

Nolasco: uso de fibras de coco em compósitos com a matriz cimentícia: revisão **sistemática, 2022**, Salvador, Bahia, Brasil p. 1215

PEREIRA, Tamires Galvão Tavares. Efeito da carbonatação acelerada em compósitos de fibrocimento extrudados com resíduo de quartzito e fibras de coco / Tamires Galvão Tavares Pereira. - 2021. 86 p.

RAABE, JOABEL. **Compósitos de fibrocimento com fibras de polpa celulósica modificada com nano-sílica**. Tese de Doutorado apresentada à Universidade de Brasília UNB, 2019.

ROGÉRIO J. Santos, RICARDO VICTOR R. Barbosa, GABRIEL CASTAÑEDA

ROVEDA, Ana Paula *et al.* **Morfologia, índice meiótico, viabilidade polínica e citoquímica de *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O. F. Cook**, 2021.

SANTOS, F. A. *et al.* **Potencial da Palha de Cana de Açúcar para Produção de Etanol: Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SANTOS, S. F. *et al.* **Supercritical carbonation treatment on extruded fibre – cement reinforced with vegetable fibres**: *Cement and Concrete Composites*, v. 56, p. 84-94, 2015.

SARMIENTO, C. R.; FREIRE, W. J. **Tratamento aplicado ao bagaço de cana-de- açúcar visando sua utilização para fins de material de construção**. In: Workshop reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil. Anais... São Paulo: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, pp. 132-37. 1996.

SEGAL, L. *et al.* **An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer**. *Textile Research Journal*, Princeton, v. 29, n. 10, p. 786-794, Oct. 1959.

SILVA, M. F. *et al.* **Fibras de juta e micro/nanofibrilas como reforço em extrusados: 4º Congresso Brasileiro de Materiais Compósitos**, Mar 2019

SNELLINGS, R. *et al.* **RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages**. *Materials and Structures*, v. 51 n. 6 p.172., 2018.

SOTO, Y. J. M. **Adequação de formulações para a produção de placas de fibrocimento por extrusão**. 2010. 201 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

TEIXEIRA, R. S. *et al.* **Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibres**. *Key Engineering Materials*, Arlington, v. 517, n. 4, p. 450-457, June 2012.

TONOLI, G. H. D. *et al.* **Performance and durability of cement based composites reinforced with refined sisal pulp**: *Materials and Manufacturing Processes*, Berlin, v. 22, n. 2, p. 149-156, Feb. 2007.

## SEGUNDA PARTE

### ARTIGO 1- EFEITO DO TRATAMENTO COM SULFATO DE ALUMÍNIO E DA CARBONATAÇÃO ACELERADA EM FIBROCIMENTO EXTRUDADO COM PARTICULAS DE MADEIRA DE ERITHRYNA POEPPIGIANA

#### RESUMO

O fibrocimento é um material amplamente utilizado na construção civil devido às suas boas propriedades. No entanto, a necessidade de melhorar as suas características físicas e mecânicas tem impulsionado a pesquisa de novos aditivos e técnicas de produção. Neste contexto a pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento e avaliação de fibrocimento extrudados carbonatados, empregando como reforço madeira de *Erithryna poeppigiana* mineralizada com sulfato de alumínio. As partículas de *Erithryna* foram analisadas quimicamente. Na produção dos compósitos, utilizou-se cimento potland CPV-ARI, calcário, partículas de *Erithryna*, sulfato de alumínio para mineralização, além dos aditivos (HPMC) e (ADVA). Após 3 dias de cura os fibrocimentos foram submetidos à carbonatação acelerada por um período de 24h. Os fibrocimentos foram caracterizados quanto às propriedades físicas (densidade aparente, absorção de água e porosidade aparente), permeabilidade ao ar e condutividade térmica e mecânicas (módulo de ruptura, módulo de elasticidade, limite de proporcionalidade e tenacidade) em flexão estática após 25 dias de cura. Foram realizadas as análises (FTIR), e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar a interação entre os materiais constituintes. Como resultados houve um aumento na densidade aparente, redução na porosidade, absorção de água, aumento nos valores de MOE, MOR e tenacidade. Para o FTIR foi possível verificar que houve formação de carbonato de cálcio, levando a diminuição da alcalinidade da matriz. Estes resultados sublinham o potencial do uso de sulfato de alumínio como aditivo no aprimoramento do desempenho do fibrocimento, tornando-o uma opção promissora para aplicações que exigem materiais com propriedades otimizadas.

**Palavras chaves:** Sulfato de alumínio, *Erithryna poeppigiana*, fibras vegetais.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade na indústria da construção tem impulsionado a busca por materiais alternativos que possam reduzir o impacto ambiental e melhorar a eficiência dos processos construtivos. Neste contexto o fibrocimento extrudado tem se destacado como uma alternativa promissora, devido às suas propriedades mecânicas e durabilidade. Além disso, a incorporação de resíduos de fibras vegetais oferece uma abordagem sustentável para aprimorar as características do fibrocimento, contribuindo para a redução do desperdício e a utilização de recursos renováveis.

A *Erythrina poeppigiana* é uma espécie arbórea pertencente à família Fabaceae (Papilionoideae). É consorciada em plantações de cacau por ser uma espécie caducifólia e possui potencial paisagístico devido a exuberância das flores (ROVEDA *et al.*, 2021), mas com escassez de estudos que explorem o conhecimento tecnológico dessa madeira. A *Erythrina* é uma espécie exótica que não apresenta boa qualidade quando utilizada como madeira sólida

O amplo emprego de materiais feitos à base de cimento na indústria da construção é primordialmente atribuído à sua versatilidade, eficácia e características mecânicas (ZHAO *et al.*, 2020). A inclusão de fibras na estrutura do cimento proporciona benefícios significativos, tais como o aprimoramento da tenacidade à fratura do material (NAQI *et al.*, 2019). As propriedades dos compósitos e, conseqüentemente, suas possíveis aplicações são amplamente influenciadas pelo tipo de biomassa empregada ALENCAR *et al.* (2023).

O uso do sulfato de alumínio como tratamento químico de fibras vegetais visa protegê-las dos efeitos negativos do ambiente alcalino criado pelo cimento, promovendo a mineralização da superfície das fibras Sarmiento e Freire 1996.

Outro método capaz de aprimorar a qualidade dos compósitos é a carbonatação acelerada. Esse processo em materiais à base de cimento é considerado um dos métodos mais eficazes e eficientes para a preparação de materiais de construção (de acordo com WANG *et al.*, 2019). Assim, a carbonatação acelerada é um método de cura que pode impactar tanto as propriedades mecânicas quanto a durabilidade dos compósitos de fibrocimento reforçado com fibras vegetais, conforme observado por FILOMENO *et al.* (2020).

Neste sentido, o objetivo deste artigo foi analisar os impactos nas características físicas, mecânicas e microestruturais de compósitos de fibrocimentos produzidos a

partir de partículas de *Eritryna poeppigiana* mineralizadas com sulfato de alumínio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  e submetidas posteriormente a carbonatação acelerada.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Obtenção do material

Para a condução deste estudo, foram empregadas fibras de *Eritryna poeppigiana*, como elemento de reforço nos fibrocimentos. A madeira de *Erythrina*. foi proveniente de plantios experimentais da Universidade Federal do Sul da Bahia, na cidade de Ilhéus- Bahia, Brasil. Toras de 4 metros de comprimento foram enviadas a Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM) da Universidade Federal de Lavras, onde foram seccionadas em toretes de 58 cm de comprimento e posteriormente foram armazenadas em um tanque contendo água quente por 24 h para posterior laminação.

Lâminas de 2 mm de espessura foram obtidas em um torno laminador e foram processadas em um moinho martelo para geração de partículas do tipo *sliver*. O material particulado foi peneirado, através de um conjunto de peneiras sobrepostas, cujas aberturas foram de 20 mesh (superior) e 40 mesh (inferior), respectivamente. Sendo utilizada a fração retida na peneira de 40 mesh.

### 2.1 Caracterização do material

Para caracterização química da madeira de *Eritryna* foram determinados os teores de lignina insolúvel conforme a NBR 7.989 (ABNT, 2010a), a porcentagem de extrativos de acordo com a NBR 14.853 (ABNT, 2010b), a porcentagem de cinzas conforme a NBR 13.999 (ABNT, 2003), a porcentagem de celulose segundo os critérios de Kennedy *et al.*, (1987), holocelulose descritos por Browning (1963), e a porcentagem de hemicelulose foi calculada por diferença entre holocelulose e celulose.

### 2.2 Mineralização das partículas

As partículas de madeira foram submetidas à mineralização mediante a aplicação de uma solução de sulfato de alumínio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  na concentração de 9% e 5% de partículas. As partículas foram adicionadas a um misturador planetário junto com a solução de sulfato de alumínio e foram agitadas por 3 minutos. Após esse procedimento, as partículas foram deixadas em repouso por um período de 15 minutos, permitido assim o processo de mineralização (PANTAWÉ *et al.*, 2017).

### 2.3 Produção dos compósitos

Os compósitos foram fabricados em escala laboratorial utilizando o método de extrusão. A matriz cimentícia empregada constituiu em cimento Portland CPV-ARI (conforme a norma NBR 5733).

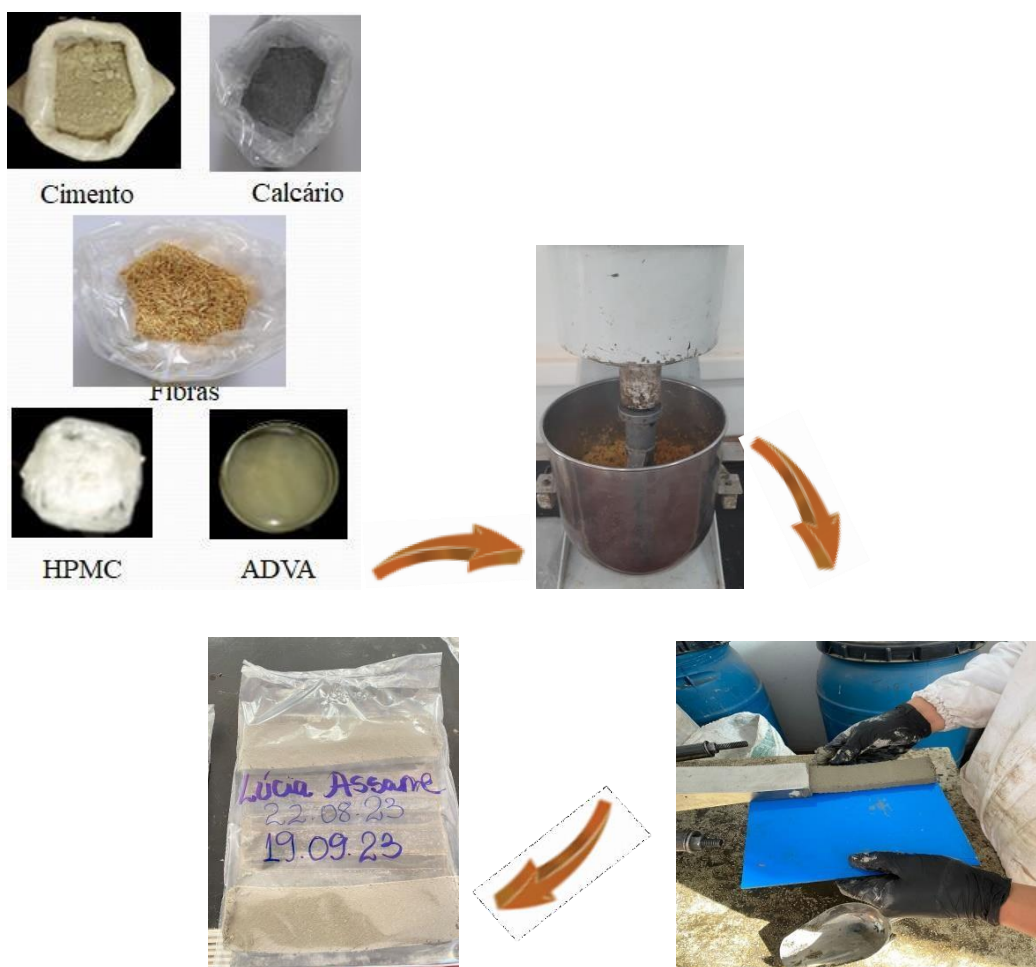
A formulação adotada na fabricação dos compósitos foi conforme descrita por (TEIXEIRA, 2010; TONOLI *et al.*, 2010). Essa formulação incluiu 5% de material lignocelulósico, 30% de calcário agrícola moído, 1% de hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), e 1% de aditivo polieter carboxílico (ADVA). O restante da composição, totalizando 100%, foi composto por cimento Portland CPV-ARI.

O ADVA foi empregado com o propósito de reduzir o atrito entre a massa resultante e a extrusora, aprimorando assim a manipulação do material. Por outro lado, o HPMC foi utilizado para assegurar o comportamento pseudoplástico da mistura, facilitando o processo de extrusão. Esses modificadores são destacados na literatura como os mais eficientes para a produção de fibrocimento por extrusão (SHEN, 2003).

As matérias-primas necessárias foram pesadas e separadas, conforme ilustrado na Figura 3. Todos os componentes foram então combinados em uma bateadeira planetária. Inicialmente, cimento, calcário foram misturados. Em seguida, o material lignocelulósico, o Hidroxipropilmetilcelulose (HPMC), poliéster carboxílico (ADVA) e a água foram adicionados, mantendo uma rotação de 27,02 rad/s por 5 minutos para assegurar a distribuição uniforme das partículas na mistura formada. A pasta cimentícia resultante foi processada em extrusora helicoidal da marca VERDÉS mod. 051, equipada com controlador de velocidade de rosca e vácuo.

Para todos os tratamentos, foram produzidos 24 corpos de prova com dimensões aproximadas de 210 mm x 30 mm x 20 mm (comprimento, largura e espessura). Os corpos de prova produzidos foram armazenados em sacos plásticos e selados para a cura durante 28 dias. Após o processo de cura, os compósitos foram cortados em dimensões aproximadas de 180 x 30 x 20 mm. Esses corpos de prova foram utilizados para ensaios subsequentes.

**Figura 3:** Esquema do Processo de produção dos compósitos



Fonte: Da autora (2024)

## 2.4 Carbonatação Acelerada

Após a produção os corpos de prova, foram armazenados em um saco plástico selado, mantido em condições saturadas e em temperatura ambiente (25°C) por um período de três dias, período este necessário para o pré-endurecimento. Posteriormente, a carbonatação acelerada foi conduzida utilizando uma metodologia ajustada por PEREIRA, (2021), na qual a autoclave foi conectada a um cilindro de CO<sub>2</sub> de grau industrial com pureza de 99% por meio de um mangote.

Uma pressão constante de 0,75 MPa foi mantida. Os compósitos foram submetidos à carbonatação durante 24 horas. Em seguida, os corpos de prova foram devidamente selados em um saco plástico a temperatura ambiente de 25°C por um período de 25 dias, completando assim o ciclo de cura de 28 dias, antes de serem submetidos as análises PEREIRA, (2021).

## 2.5 Propriedades físicas dos compósitos

Neste estudo, foram analisadas as propriedades físicas que incluem absorção de água (AA), densidade aparente (DA) e porosidade aparente (PA). Os corpos de prova passaram por um processo em que foram submersos em água por 24 horas, permitindo a medição das massas imersas (MI) e úmidas (MU). Em seguida, foram submetidos a uma estufa a 105°C por 24 horas para a obtenção da massa a seca (MS). Os cálculos das propriedades físicas seguiram os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM C 948-81 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1981).

## 2.6 Propriedades mecânicas dos compósitos por flexão

Os ensaios mecânicos foram conduzidos utilizando uma máquina de teste universal da marca Arotec, equipada com uma célula de carga de 2KN. Para a determinação dos valores do módulo de ruptura (MOR), Modulo de elasticidade (MOE) e Tenacidade do material, foi empregada uma configuração com três cutelos, onde o vão inferior era fixado em 132 mm. Os parâmetros do ensaio foram ajustados com base em procedimentos adaptados descritos por NBR 15498 (2021)

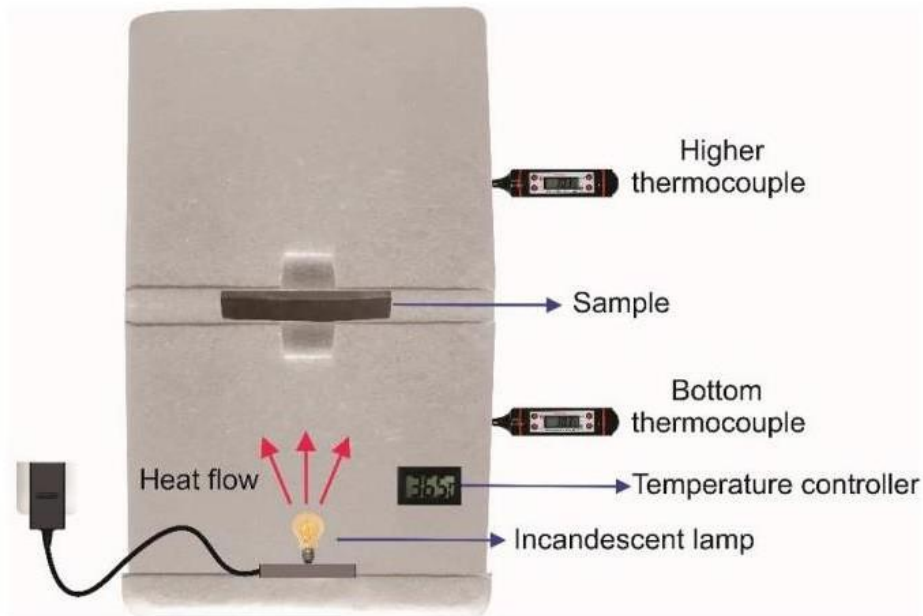
## 2.7 Ensaio de condutividade térmica dos compósitos

Para o ensaio da condutividade térmica nos compósitos foram utilizados os métodos delineados por Terra *et al.* (2023). Foi utilizado um sistema composto por duas câmaras superpostas, e ambas foram revestidas internamente com uma camada de isopor e, mais internamente, com uma manta térmica, garantindo assim que não houvesse interferência na temperatura ambiente interna. As câmaras foram usadas para aquecer as amostras, e o processo foi monitorado até que a temperatura se estabilize. Durante esse período, os valores foram registados tanto na face exposta à radiação da lâmpada quanto na face não exposta. A condutividade térmica foi calculada utilizando a Equação.

$$K = \frac{P * E}{\Delta T}$$

Onde, K representa a condutividade térmica em unidades de W/°C; P refere-se à radiação por unidade de área em W/m<sup>2</sup>; E representa a espessura do corpo de prova em metros; e  $\Delta T$  é a variação de temperatura observada em graus Celsius.

**Figura 6:** Equipamento usado para Ensaio Térmico



Fonte: Baptista *et al.* (2024)

## 2.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram capturadas usando um microscópio eletrônico de varredura modelo LEO EVO 40 XVP (Carl, Zeiss, 2002), operando a uma voltagem de 10kV. As análises foram conduzidas na superfície de fratura das placas que foram submetidas ao ensaio de flexão estática. O propósito dessa observação foi de analisar os efeitos da carbonatação acelerada nas propriedades físico-mecânico do fibrocimento, bem como examinar a influência dessa condição na interface entre a fibra e a matriz.

## 2.9 Permeabilidade ao ar

A avaliação da permeabilidade ao ar foi conduzida por meio de um permeador de ar confeccionado em laboratório, conforme detalhado anteriormente por DEY *et al.* (2014) e INNOCENTINI *et al.* (2005). Os coeficientes de permeabilidade das amostras, foram determinados por meio da aplicação da equação de Forchheimer. Essa equação amplamente reconhecida na literatura como uma relação empírica, expressa a dependência parabólica da queda de pressão através de um meio em relação à velocidade superficial resultante do fluido.

$$\frac{DP}{L} = \frac{\mu}{K_1} V_s + \frac{\rho}{K_2} V^2$$

Onde: L é a espessura

$\mu$  - Indica a viscosidade

$\rho$ - Densidade do fluido

$K_1$ - coeficiente de permeabilidade Darciano

$K_2$ - coeficiente de permeabilidade não-Darciano

## 2.10 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com transformada de fourier (FTIR) do compósito

A análise por espectroscopia FTIR por transmitância foi conduzida após a pré-secagem dos materiais a 50 °C para assegurar a remoção completa da umidade. Em seguida, os materiais foram incorporados ao KBr na proporção de 1:100 (em massa), misturados de forma homogênea e triturados. Os espectros de FTIR foram adquiridos utilizando o espectrômetro Irapurity<sup>-1</sup>, fabricado pela Shimadzu, no intervalo de frequência entre 400 e 4000 cm<sup>-1</sup>, com uma resolução de 2 cm<sup>-1</sup>.

### **2.11 Análise de dados**

Os resultados deste projeto foram avaliados usando um delineamento inteiramente casualizado. A análise de variância e o teste de médias de Scott-Knott foram conduzidos com um nível de significância de 5%.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Caracterização química da partícula de *Erithryna Poeppigiana*

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios, juntamente com seus respectivos desvios padrão, referentes à composição química das partículas tanto *in natura* quanto tratadas.

**Tabela 1** - Composição química das partículas de *Erithryna* *in natura* e tratada com sulfato de alumínio.

Análises (%)	Partículas <i>in natura</i>	Partículas tratadas Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Extrativos totais	9,54 ± 1,37	10,47 ± 2,04
Lignina insolúvel	18,92 ± 1,03	11,92 ± 5,03
Celulose	43,01 ± 1,53	58,79 ± 0,87
Hemiceluloses	18,01 ± 1,97	17,49 ± 3,28
Cinzas	3,13 ± 0,075	4,98 ± 0,078

Os resultados das análises químicas indicaram que o tratamento com sulfato de alumínio reduziu o teor de lignina nas partículas de *Erithryna poeppigiana* de 18,92% para 11,92%, ao mesmo tempo em que aumentou o teor de celulose de 43,01% para 58,79%, devido à ação seletiva do sulfato de alumínio, que remove a lignina preservando a celulose e a hemicelulose. Essas modificações são essenciais para melhorar as propriedades das partículas na fabricação de fibrocimentos, otimizando a adesão entre as partículas e a matriz cimentícia e aprimorando as características mecânicas do compósito final. No entanto, uma alta quantidade de extrativos pode prejudicar a compatibilidade entre a madeira e a matriz, afetando a dispersão e as propriedades mecânicas do compósito. Por outro lado, uma alta concentração de celulose aprimora a resistência mecânica, aumentando a rigidez e a capacidade de suportar cargas. A hemicelulose pode resultar em maior absorção de umidade, levando à degradação das propriedades mecânicas ao longo do tempo, especialmente em ambientes húmidos. A lignina, embora melhore a resistência ao impacto e a rigidez, pode reduzir a flexibilidade, mas também pode atuar como agente compatibilizante natural entre a madeira e a matriz polimérica.

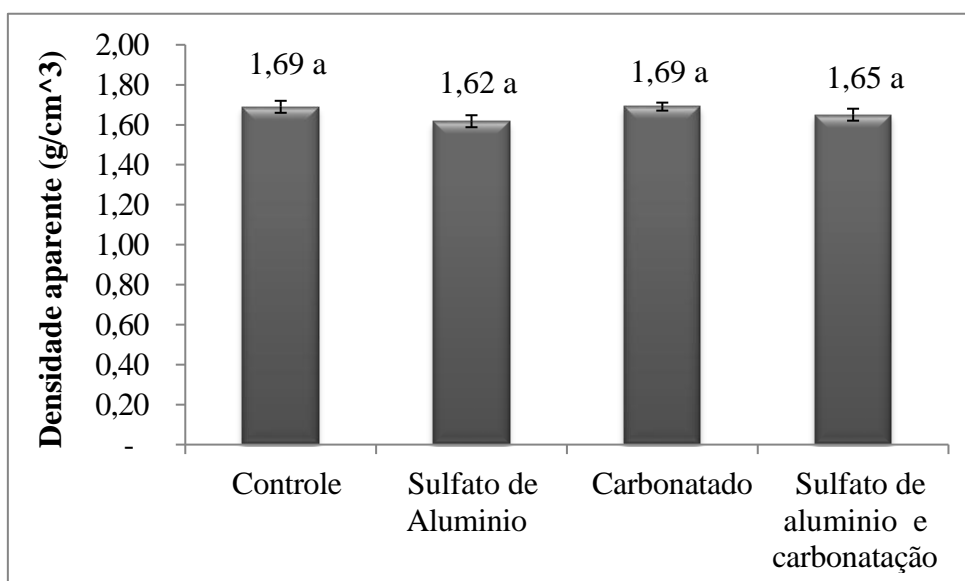
PANTAWEE, S. *et al.* (2017) avaliaram a fibra de Cânhamo tratada com sulfato de alumínio em diferentes proporções e observaram uma redução no teor de celulose e um aumento no teor de lignina após o tratamento. FONSECA *et al.* (2019) avaliaram o desempenho das fibras de juta como reforço em fibrocimento extrudado. As fibras foram tratadas com NaOH, resultando em um teor de lignina de 11,07%, similar ao encontrado neste estudo. Este resultado evidencia a eficácia do tratamento com NaOH na modificação das propriedades das fibras de juta para uso em fibrocimento. Assim como teve um aumento na percentagem de celulose de 53,1% para 75% .

### 3.2 Propriedades Físicas dos compósitos

#### 3.2.1 Densidade Aparente

Na figura 1, estão apresentados os resultados das propriedades físicas dos compósitos.

**Figura 1** - Médias obtidas para a densidade aparente dos fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2024)

Nos resultados, embora haja pequenas variações na densidade aparente entre os tratamentos, essas variações não são suficientemente grandes para serem consideradas estatisticamente significativas. Assim, o tratamento com sulfato de alumínio, a carbonatação, ou a combinação dos dois não alteraram significativamente a densidade aparente das amostras em comparação com o controle. O aumento da densidade aparente em fibrocimentos contendo fibras mineralizadas pode estar associado à formação mais pronunciada de etringita, conforme observado por (Baptista *et al.*, 2024). Esses cristais de etringita crescem

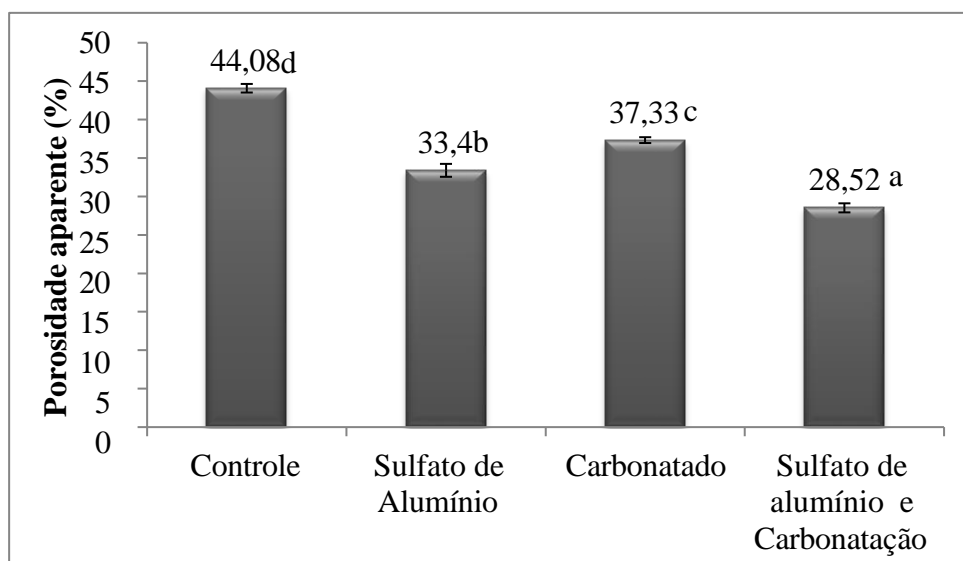
de forma interligada, formando uma rede extensa que serve como estrutura de suporte para a pasta de cimento, contribuindo para o aumento da densidade. Além disso, o sulfato de alumínio facilita a compactação das partículas, diminuindo os espaços vazios e aumentando a densidade do material. Quando combinado com a carbonatação, ocorre uma reorganização adicional da microestrutura, que potencializa o efeito de aglomeração, embora de forma ligeiramente menos intensa do que o tratamento com sulfato de alumínio isoladamente. Portanto, o principal fator que contribuiu para a elevação da densidade aparente foi a capacidade do sulfato de alumínio de alterar a estrutura das partículas, resultando numa maior compactação e densidade final do material.

Pizzol et al. (2014) e Filomeno (2023) observaram que os compósitos cimentícios expostos à carbonatação acelerada mostraram valores mais altos de densidade aparente. Os estudos conduziram o processo de carbonatação acelerada em uma câmara climática. Vale ressaltar que, em diversas aplicações, a utilização de fibrocimentos com densidade reduzida oferece benefícios, pois melhora o isolamento acústico e térmico, características essenciais para fibrocimentos empregados em coberturas, como no caso das telhas Filomeno (2023).

### 3.2.2 Porosidade aparente

Na Figura 2, é possível notar uma diminuição significativa entre os valores médios de porosidade nos diferentes tratamentos.

**Figura 2** - Médias obtidas para a porosidade aparente dos fibrocimentos



Fonte: Da autora (2024)

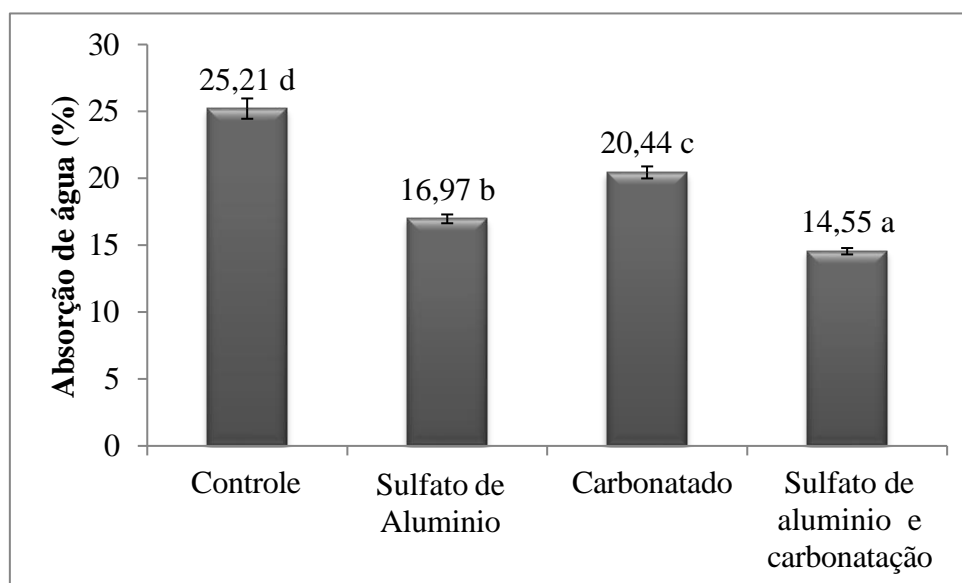
Os resultados mostraram que a porosidade aparente foi maior no Controle (44,08%) e significativamente menor nas amostras tratadas com Sulfato de Alumínio e Carbonatação (28,52%), indicando que esses tratamentos contribuíram para a compactação do material. A amostra tratada apenas com Sulfato de Alumínio (33,4%) apresentou uma redução substancial na porosidade, sugerindo que a formação de compostos com sulfato de alumínio preencheu os poros. A Carbonatação, por sua vez, reduziu a porosidade para 37,33%, mas de forma menos eficaz que o tratamento com sulfato de alumínio. A combinação de ambos os tratamentos resultou na menor porosidade, evidenciando um efeito sinérgico que maximiza a compactação do material, potencialmente melhorando sua durabilidade e resistência. O tratamento apresenta uma porosidade mais elevada, resultando em uma maior absorção de água como pode ser observado na Figura 3. Devido à maior quantidade de poros, apresentou uma densidade menor. No entanto, a porosidade foi reduzida nos fibrocimentos tratados..

FILOMENO (2023), ao avaliar a carbonatação acelerada em compósitos produzidos com diferentes teores de polpa celulósica, observou também que houve uma redução na porosidade nas amostras com menores concentrações de polpa celulósica.

FIORONI *et al.* (2020) também observou uma diminuição na porosidade, isso porque houve a formação de carbonato de cálcio que preencheu os vazios.

### 3.2.3 Absorção de Água

**Figura 3** - Médias obtidas para a Absorção de água dos fibrocimentos.



Fonte: Da autora (2024)

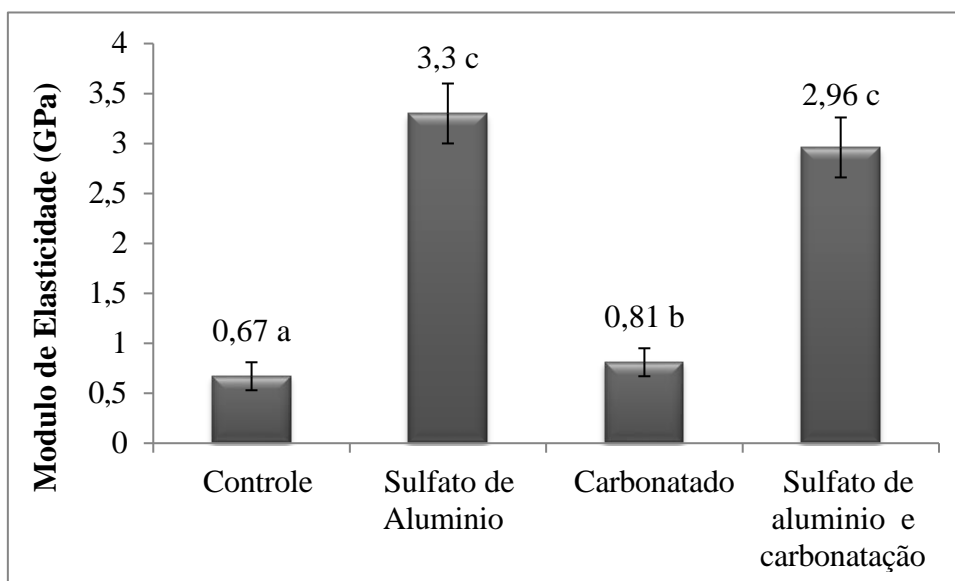
Pelos resultados obtidos para a absorção de água, nota-se que houve uma diminuição significativa na absorção de água, isso deveu-se ao tratamento prévio da partícula. Fioroni *et al.* (2020) ao curar o material com a carbonatação acelerada também observaram uma diminuição na absorção de água.

Os resultados obtidos para as propriedades físicas estiveram dentro dos padrões estabelecidos pela NBR 12800 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1993), que determina que o fibrocimento usado em telhas sem amianto deve ter uma absorção de água não superior a 37%. No entanto, o fibrocimento analisado apresentou uma absorção de água variando de 14,55% a 25,21%.

### 3.3 Propriedades Mecânicas dos compósitos

#### 3.3.1 Módulo de Elasticidade

**Figura 4-** Valores médios de módulo elasticidade obtidos pelo ensaio mecânico de flexão.



Fonte: Da autora (2024)

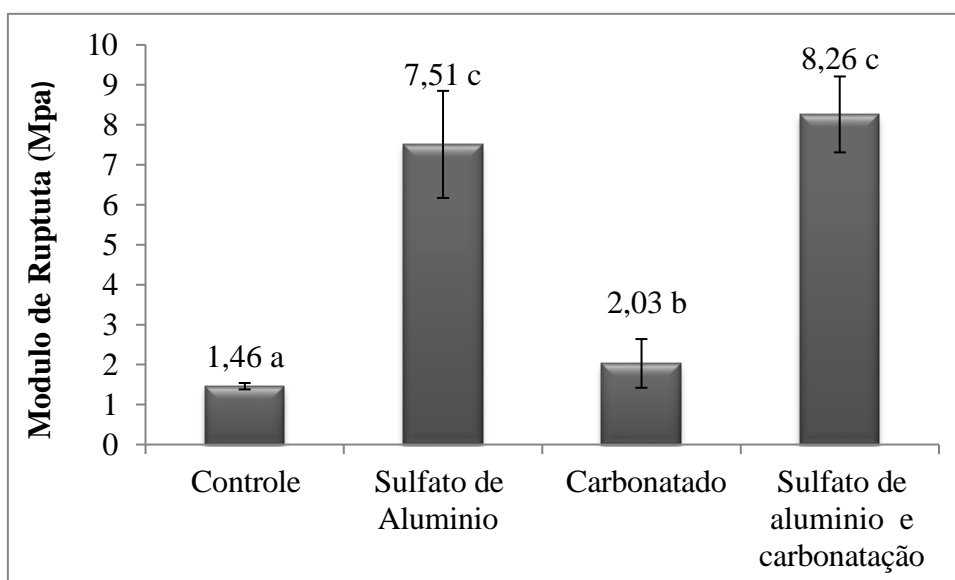
Os resultados do MOE indicam diferenças significativas entre os tratamentos. O controle apresentou um MOE de 0,67, enquanto o material tratado teve um MOE significativamente maior de 3,3, sugerindo que o tratamento com sulfato de alumínio aumentou consideravelmente a rigidez do material. Para o controle carbonatado, o MOE foi de 0,58, e para o tratado carbonatado, o MOE aumentou para 2,96. Esses resultados indicam que tanto o tratamento quanto a carbonatação aumentam a rigidez do material, com os materiais tratados apresentando um MOE mais elevado em comparação com os não tratados,

evidenciando a eficácia dos tratamentos em melhorar as propriedades mecânicas dos fibrocimentos. FILOMENO (2023) e FIORONI *et al.* (2020), também obtiveram maiores valores de MOE após tratamento com sulfato de alumínio.

Borges *et al.* (2024), observaram que o tratamento com sulfato de alumínio em polpa Kraft de *Pinus spp* resultou em um aumento no valor de MOE após o tratamento de 1,6 GPa para 2,5 GPa.

### 3.3.2 Modulo de Ruptura

**Figura 5-** Valores médios de módulo de ruptura obtidos pelo ensaio mecânico de flexão.



Fonte: Da autora (2024)

Neste estudo, pode-se inferir que tanto o tratamento com sulfato de alumínio quanto a carbonatação acelerada influenciaram positivamente o comportamento dos fibrocimentos, resultando em um aumento significativo da resistência do compósito.

Borges *et al.* (2024), ao avaliar o efeito do tratamento com sulfato de alumínio em polpa Kraft de *Pinus spp* obteve um aumento no valor MOR após o tratamento de 8,9 MPa para 9,4 MPa.

Mendes (2014), ao investigar o efeito da modificação química por silanos em polpa celulósica de eucalipto nas propriedades físico-mecânicas de fibrocimentos produzidos por extrusão, relatou valores de Módulo de Ruptura (MOR) variando de 6,42 a 8,29 MPa, resultados iguais a esta pesquisa.

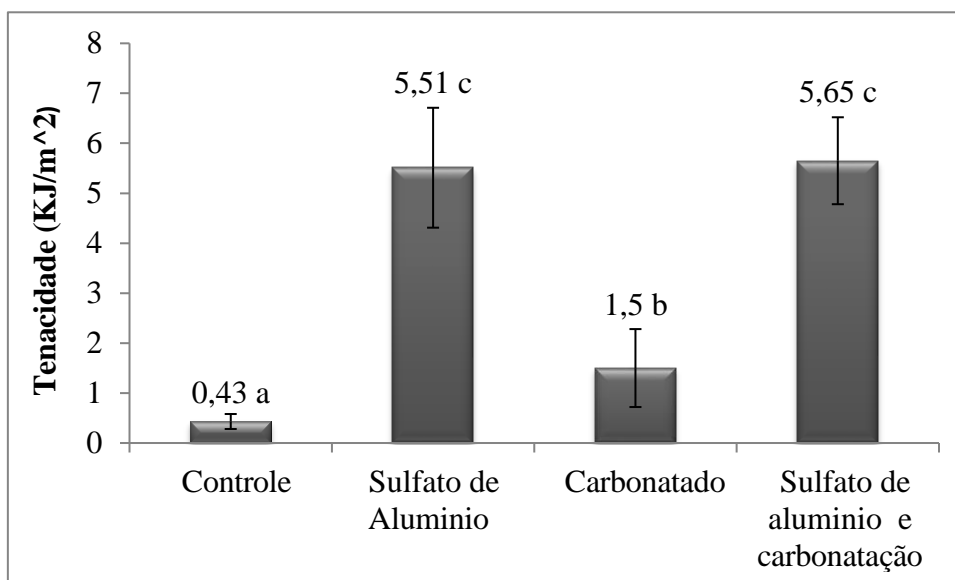
Silva (2016) ao investigar o efeito de diferentes níveis de reforço com fibras de

eucalipto nas propriedades físico-mecânicas de fibrocimento, relatou valores de MOR 6,26 a 6,68 MPa.

Todos os tratamentos realizados nesta pesquisa foram classificados como categoria 3 conforme a norma NBR 15498 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2007). Esta categoria abrange fibrocimentos com Módulo de Ruptura (MOR) variando de 7 a 13 MPa, adequados para aplicação em placas de fibrocimento sem amianto. No presente estudo, os valores encontrados variaram de 1,46 a 8,26 MPa.

### 3.3.3 Tenacidade

**Figura 6** - Valores médios de tenacidade obtidos pelo ensaio mecânico de flexão.



Fonte: Da autora (2024)

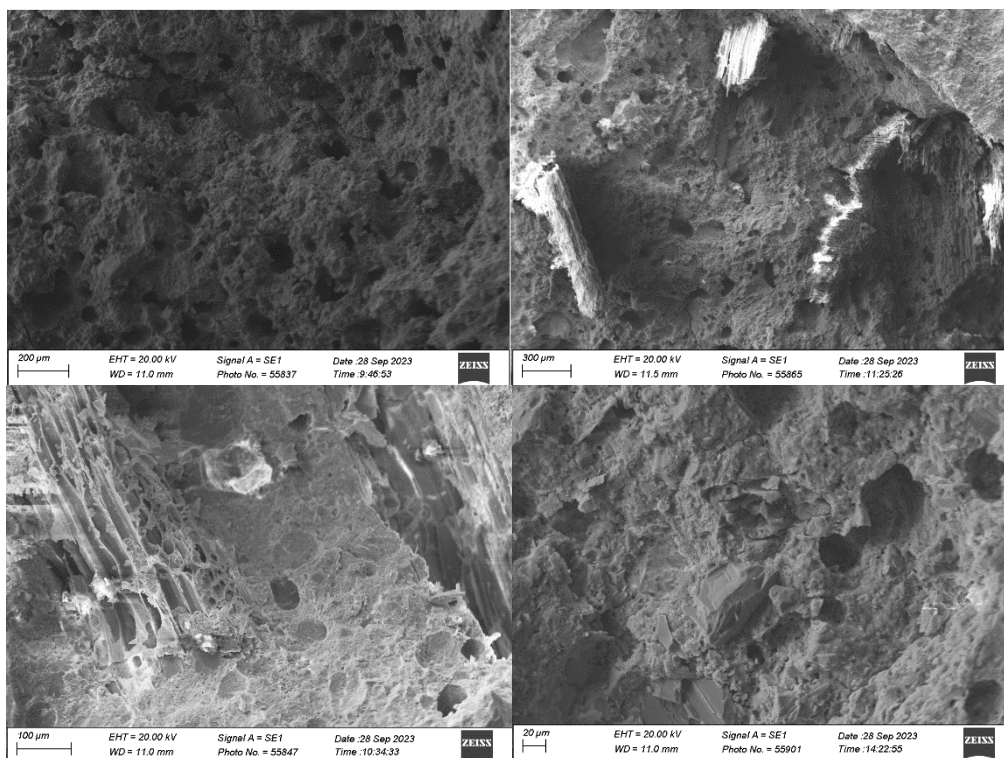
Os fibrocimentos produzidos com partículas tratadas com sulfato de alumínio e sujeitas à carbonatação mostraram uma diferença notável em relação aos outros tratamentos, exibindo uma maior tenacidade. Tanto a carbonatação acelerada quanto o tratamento com sulfato de alumínio influenciaram significativamente os resultados obtidos. Isso sugere que esses processos contribuíram para reduzir a degradação da partícula de *Erithryna* e melhorar sua interação com a matriz de cimento.

Nos estudos de ALMEIDA *et al.* (2013), ao investigarem compósitos de cimento reforçados com polpa de eucalipto, e TERRA (2023) ao examinarem compósitos de fibrocimento de celulose, observaram que as amostras submetidas à carbonatação acelerada apresentaram valores médios de tenacidade mais elevados iguais nesta pesquisa.

### 3.4 Análise de MEV

A caracterização microestrutural dos compósitos de fibrocimento, carbonatados ou não aos 28 dias de idade, foi conduzida por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A Figura 16 apresenta as micrografias obtidas para os compósitos carbonatados nos diferentes tratamentos.

**Figura 7:** Micrografias obtidas após os 28 dias.



Fonte: Da autora (2024)

**Legenda:** (a) Controle, (b) Carbonatado, (c) sulfato de alumínio, (d) Sulfato de alumínio e carbonatação.

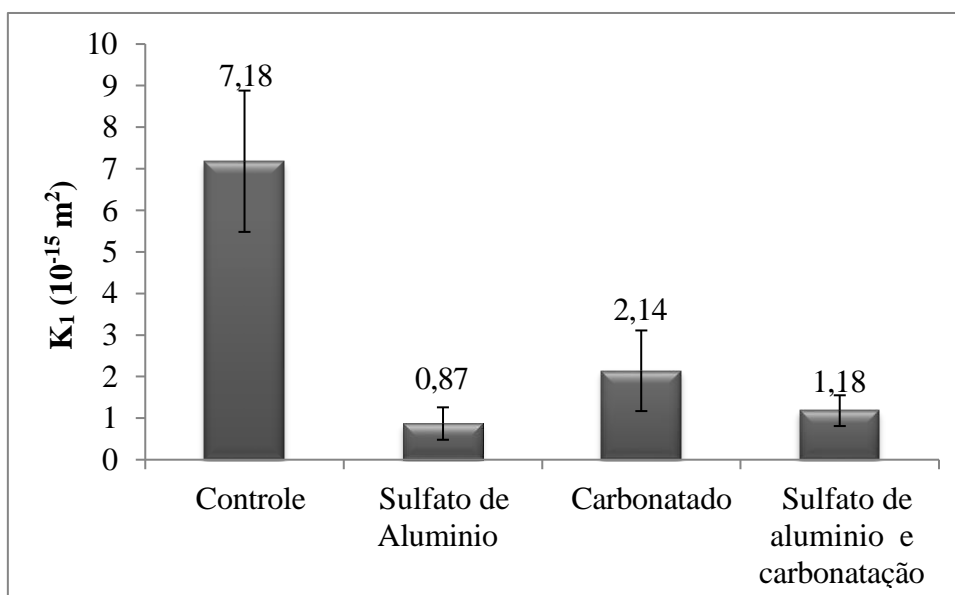
A análise das imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostra que a amostra controle apresenta uma matriz cimentícia porosa e homogênea, o controle tratado com sulfato de alumínio exibe uma matriz mais densa com redução de porosidade e evidências de melhor ligação entre as fibras e a matriz, o controle carbonatado apresenta alterações na superfície com possíveis produtos de carbonatação e uma estrutura porosa, e a amostra tratada e carbonatada mostra formação de cristais, indicando a presença de produtos de carbonatação como carbonato de cálcio, com uma

microestrutura densa e alterações na superfície e nos poros. Essa observação também foi feita por ALMEIDA *et al.* (2010) e por TERRA (2023), onde os autores notaram que nos corpos de prova submetidos à carbonatação, não houve ocorrência de fibras arrancadas. Observou-se uma matriz cimentícia densa e compacta, o que possivelmente contribuiu para uma adesão mais eficaz entre a fibra e a matriz

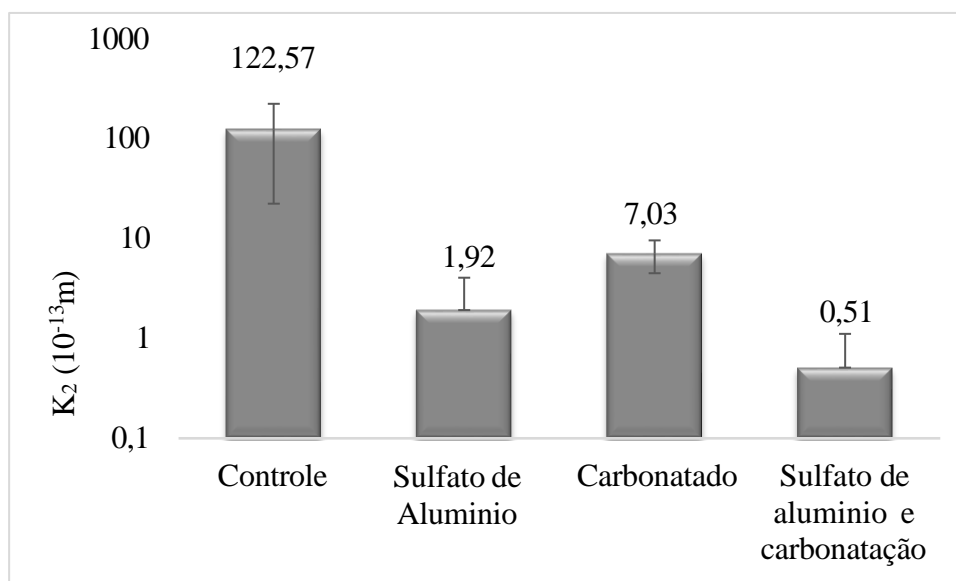
### 3.5 Permeabilidade ao ar

As figuras, mostram os valores médios dos coeficientes da permeabilidade ao ar, Darcian ( $k_1$ ) (Figura 8) e não Darcian ( $k_2$ ) (Figura 9) das amostras de fibrocimento tratadas com sulfato de alumínio e carbonatadas

**Figura 8:** valores médios de coeficiente Darcian  $K_1$



Fonte: Da autora (2024)

**Figura 9:** valores médios de coeficiente não Darcian  $K_2$ 

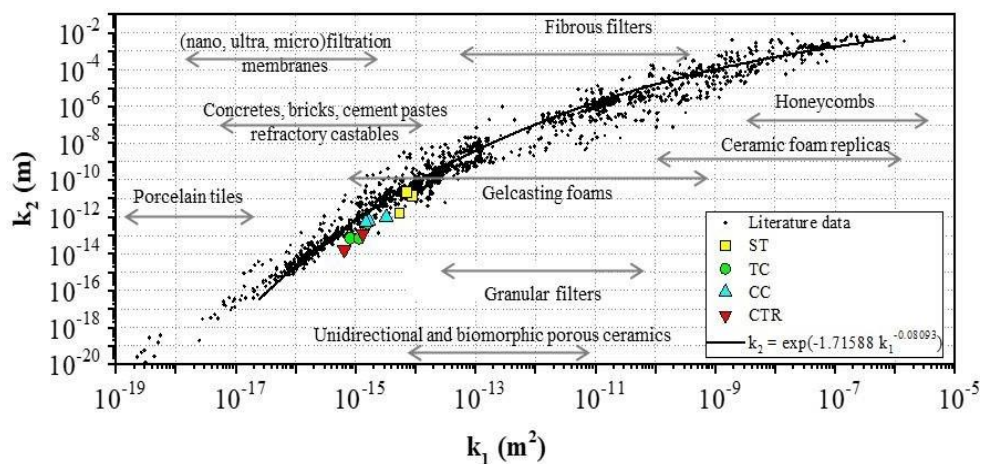
Fonte: Da autora (2024)

Os valores de  $K_1$  e  $K_2$  são altos para o fibrocimento sem tratamento, indicando alta permeabilidade ao ar. Após o tratamento com sulfato de alumínio e a carbonatação, esses valores diminuem significativamente, mostrando maior resistência e menor permeabilidade. O controle carbonatado também apresenta uma redução nos valores de  $K_1$  e  $K_2$  em comparação ao material sem tratamento, mas ainda maiores do que no material tratado. O controle tratado, por sua vez, exibe os menores valores de  $K_1$  e  $K_2$ , evidenciando a eficácia do tratamento na redução adicional da permeabilidade ao ar do fibrocimento.

Fiorini *et al.* (2020), ao avaliar o método de cura utilizando carbonatação acelerada para chapas onduladas de cimento reforçadas com fibras de polipropileno (PP) produzidas pelo processo Hatschek, obteve valores baixos dos coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  após a carbonatação. Filomeno, (2023) também obteve valores baixos dos coeficientes  $K_1$  e  $K_2$  para fibrocimentos com carbonatação acelerada.

Na figura 10 representa o mapa de permeabilidade com classificação dos materiais porosos e localização dos fibrocimentos testados neste trabalho.

**Figura 10:** Mapa de permeabilidade.

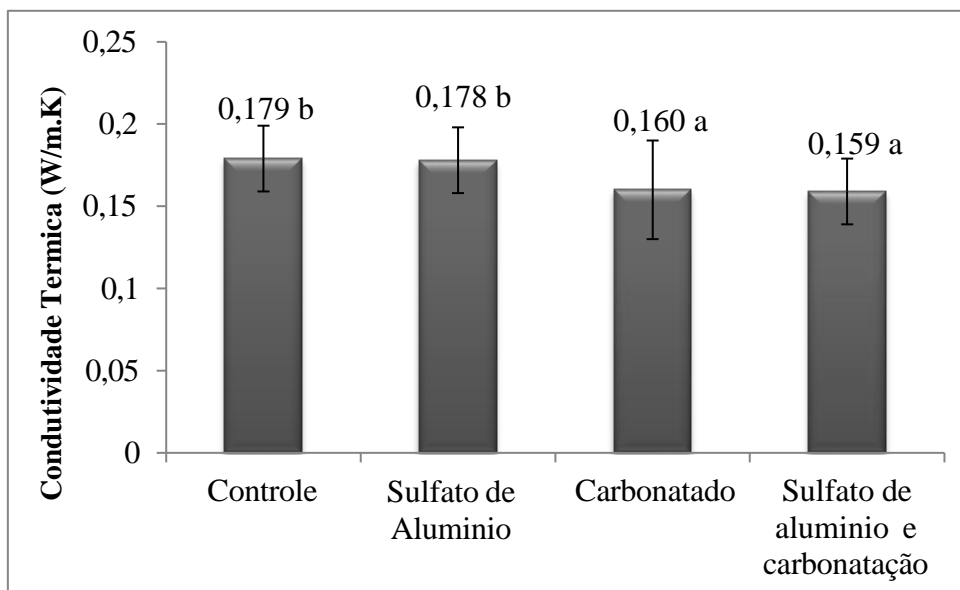


Fonte: Da autora (2024)

Na figura 10, os resultados dos fibrocimentos estão alinhados com os de outros materiais cimentícios, como concretos, argamassas, tijolos e refratários. Esses materiais, que incluem partículas finas ligadas por cimento hidráulico, formam uma matriz com baixa porosidade e pequenos vazios, resultando em uma baixa permeabilidade. Faixas de permeabilidade comparáveis foram recentemente relatadas por Fiorini, (2020) para chapas onduladas a base de Propileno.

### 3.6 Condutividade térmica

**Figura 11:** valores médios de Condutividade térmica



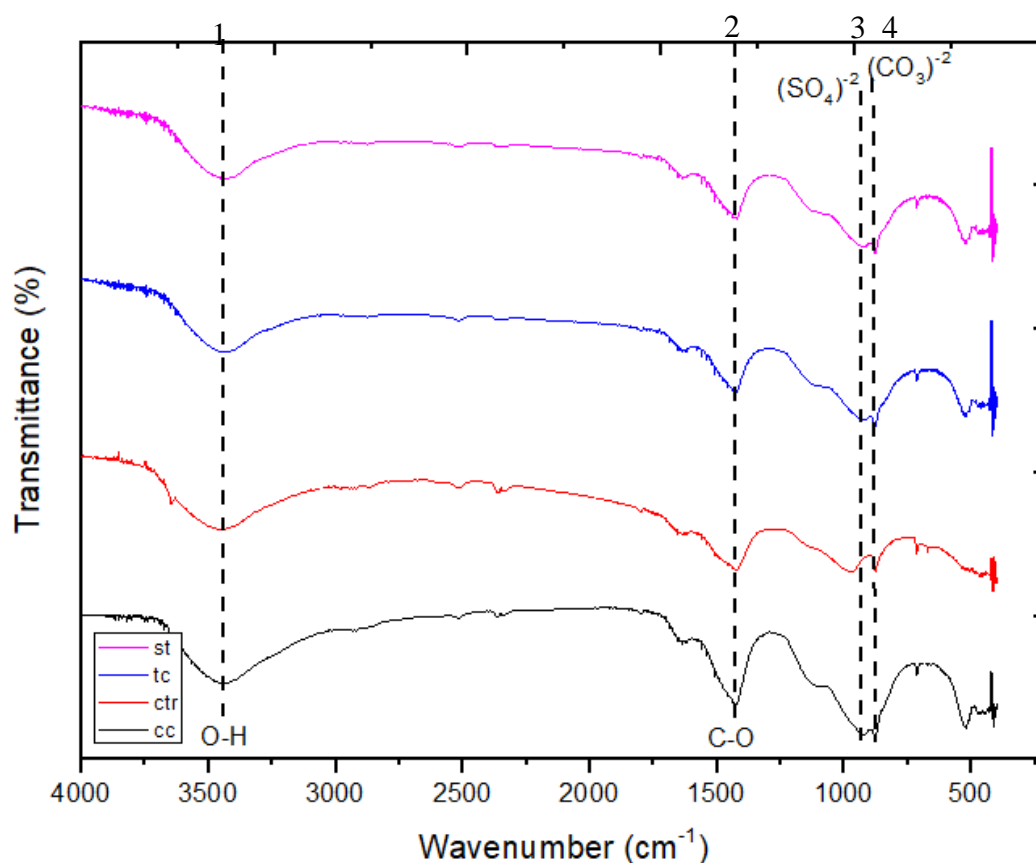
Fonte: Da autora (2024)

Os dados de condutividade térmica mostram que o material sem tratamento apresentou 0,179 W/m·K, enquanto o material tratado com sulfato de alumínio e carbonatado apresentou 0,178 W/m·K, e o controle carbonatado teve 0,160 W/m·K, com o material tratado e carbonatado apresentando 0,159 W/m·K. Esses resultados indicam que a carbonatação, independentemente do tratamento prévio com sulfato de alumínio, resultou em uma redução na condutividade térmica em relação ao material sem tratamento, com diferenças mínimas entre os materiais carbonatados resultados similares foram vistos por EUGENIO (2016).

### 3.7 Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com transformada de fourier (FTIR) do compósito

A partir da espectroscopia na região do infravermelho foi possível verificar a presença dos grupos funcionais presentes nos tratamentos realizados, na figura 18 estão descritos os dados.

**Figura 12:** FTIR de amostras de fibrocimento tratados e não tratados



As bandas referentes a OH encontram-se a 3441 a 3446  $cm^{-1}$  e estão indicadas com a numeração 1, elas podem ser referentes ao Hidróxido de cálcio  $CaOH_2$ , a banda é mais alargada devido as ligações de hidrogênio. A numeração 2 localiza-se nas bandas de 1417 a 1424  $cm^{-1}$  representam vibrações de alongamento do C-O. Enquanto a numeração 3 localizada nas bandas de 929 a 973  $cm^{-1}$  são referentes ao grupo  $SO_4$  Esse grupo pode estar relacionado com o sulfato de alumínio  $Al_2(SO_3)_4$ . As bandas referentes a vibrações de flexão do  $CO^{2-}$ , estão entre 874 e 876 e está indicado com a numeração 4.

Ao comparar os dados de fibrocimento com a literatura observou-se que para os grupos hidroxila as bandas encontradas foram de 3640  $cm^{-1}$ , e para as bandas referentes ao estiramento C-O estão localizadas a 1415 $cm^{-1}$ , e as bandas referentes as vibrações de  $CO_3^{2-}$  estão entre 715 a 875 $cm^{-1}$  (FILOMENO, 2023).

### 3. CONCLUSÃO

Observou-se uma redução no teor de lignina e um aumento nos níveis de extrativos e celulose após o tratamento com sulfato de alumínio.

Para as propriedades físico-mecânicas, houve um aumento na densidade aparente, MOR, MOE e tenacidade, além de uma redução na porosidade aparente e na absorção de água, ao utilizar 5% de partículas como reforço. Em relação ao MOR, os valores ficaram dentro da categoria 3 (7 a 13 MPa) conforme os critérios da norma NBR 15.498 (ABNT, 2007).

Em resumo, este estudo investigou os efeitos da carbonatação acelerada no fibrocimento extrudado utilizando resíduos de fibras vegetais, com foco no tratamento das partículas com sulfato de alumínio. Onde observou-se uma melhoria significativa nas propriedades do material após o tratamento, destacando-se a resistência mecânica. Notavelmente, a ausência de estudos prévios sobre o uso de *eritrina* ressalta a originalidade desta pesquisa. Esses resultados não apenas corroboram a viabilidade do método proposto, mas também sugerem novas direções para investigações futuras, explorando outras aplicações e formulações de compósitos cimentícios sustentáveis.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias da Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (**CNPq**), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (**FAPEMIG**).

## REFERÊNCIAS

ALENCAR, M. A. S. *et al.* Feasibility study of incorporation of bamboo plant fibers in cement matrices. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 2, p. 100020, 2023.

ALMEIDA, Alessandra Etuko Feuzicana de Souza *et al.* Improved durability of vegetable fiber reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. **Cement and Concrete Composites**, v. 42, p. 49-58, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) C 948-81. Test method for dry and wet bulk density, water absorption, and apparent porosity of thin sections of glass-fiber reinforced concrete. West Conshohocken (PA, USA); 1981

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010. Browning, B. L. T. Chemistry of Wood. New York: Interscience, 1963.

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, 2003b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: Madeira: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15498**: chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas. Ouro preto, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: cimento Portland de alta resistência inicial, especificação. Rio de Janeiro, Brasil, 5p., 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941-02**. Determinação da densidade básica em madeira. Rio de Janeiro, 6p., 2003.

BORGES, Ianca Oliveira *et al.* Effect of the modification of *Pinus* Kraft pulp with aluminum sulfate in cementitious composites. **European Journal of Wood and Wood Products**, p. 1-16, 2024.

CORRADINI, Elisângela et al. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, p. 837-846, 2009.

Dey, A. *et al*, **Investigations on material and mechanical properties, air-permeation behavior and filtration performance of mullite-bonded porous sic ceramics**. Int. J. Appl. Ceram. Technol. 11 (5), 804–816, 2014. <https://doi.org/10.1111/ijac.12090>

EUGÊNIO, T.M.C. **Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de argamassas de revestimento com aproveitamento de resíduos de pneus**: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biomateriais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016, 104p

FILOMENO, Rafael Henrique. **Estudo e avaliação da carbonatação acelerada no fibrocimento sob aspectos de cura, desempenho físico-mecânico, microestrutura e permeabilidade**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FIORONI, Carlos Alexandre *et al*. Cement-based corrugated sheets reinforced with polypropylene fibres subjected to a high-performance curing method. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120791, 2020.

FONSECA, Camila Soares *et al*. Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 517-527, 2019.

ZHAO, Haitao *et al*. Análise experimental e teórica sobre o efeito acoplado de hidratação, temperatura e umidade em materiais à base de cimento de idade inicial. **International Journal of Heat and Mass Transfer** , v. 146, p. 118784, 2020.

INNOCENTINI, M. D. M.; SEPULVEDA, P.; ORTEGA, F. **Permeability, chapter 4.2 in The book Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**, Michael Scheffler, Paolo Colombo (Editor), ISBN: 3-527-31320-6, 2005.

KAN, Chang Yu *et al*. Effect of aluminium sulfate on cement properties. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2013. p. 285-291.

MATSUSHITA, F.; AONO, Y.; SHIBATA, S. **Carbonation degree of autoclaved aerated concrete**. **Cement and concrete research**, v. 30, n. 11, p. 1741-1745, 2000.

MEJIA-BALLESTEROS, Julian Eduardo *et al.* Effect of activated coal waste and treated Pinus fibers on the physico-mechanical properties and durability of fibercement composites. **Construction and Building Materials**, v. 392, p. 132038, 2023.

MENDES, Rafael Farinassi. Desempenho de fibrocimentos extrudados produzidos com economias celulósicas modificadas com silanos. 2014.

NAQI, Ali *et al.* Effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the strength development of cementitious materials. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1203-1211, 2019.

PANTAWEE, S. *et al.* Utilization of hemp concrete using hemp shiv as coarse aggregate with aluminium sulfate  $[Al_2(SO_4)_3]$  and hydrated lime  $[Ca(OH)_2]$  treatment. **Construction and Building Materials**, n. 156, p. 435-442, 2017.

PEREIRA, TAMIRES GALVÃO TAVARES. **Efeito da carbonatação acelerada em compósitos de fibrocimento extrudados com resíduo de quartzito e fibras de coco** / Tamires Galvão Tavares Pereira. - 2021. 86p.

PIZZOL, Vinnicius Dordenoni *et al.* Effect of accelerated carbonation on the microstructure and physical properties of hybrid fiber-cement composites. **Minerals Engineering**, v. 59, p. 101-106, 2014.

SARMIENTO, Cecilia Ramírez; FREIRE, Wesley Jorge. Tratamento aplicado ao bagaço de cana-de-açúcar visando sua utilização para fins de materiais de construção. In: **Anais do Workshop Reciclagem e Reutilização de resíduos como materiais de construção**. São Paulo, ANTAC. 1996. p. 132-137.

SHEN, B. **Experimental approaches for determining rheological properties of cement-based extrudates**. 2003. 125 p. Thesis (Degree of Master Philosophy) - Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, 2003.

Silva, Danillo Wisky. **Influence Of Different Additives On Properties Of Cement Based Composites Reinforced With *Eucalyptus* Kraft Pulp**. 2018. Tese De Doutorado. Universidade Federal De Lavras.

TEIXEIRA, R. S. **Utilização de resíduos sucro-alcóoleiro na fabricação de fibrocimento**

**pelo processo de extrusão.** 2010. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Terra, Isabelle Cristine de Carvalho. Carbonatação acelerada em fibrocimentos compostos de resíduos de quartzito e fibras UKP / Isabelle Cristine de Carvalho Terra. - 2023. 79 p.

TONIOLI, S. E. *et al.* **Efeitos da carbonatação acelerada em compósitos do tipo Engineered Cementitious Composites.** ES Engineering and Science, v. 8, n. 3, p. 50- 61, 2019.

WANG, Jinbang *et al.* Accelerated carbonation of hardened cement pastes: Influence of porosity. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 159-169, 2019.