



JHONATAN SALES SATIRO

**COMPÓSITOS DE GESSO REFORÇADOS COM RESÍDUOS
LIGNOCELULÓSICOS E MICRO/NANOCELULOSE KRAFT**

**LAVRAS – MG
2024**

JHONATAN SALES SATIRO

**COMPÓSITOS DE GESSO REFORÇADOS COM RESÍDUOS
LIGNOCELULÓSICOS E MICRO/NANOCELULOSE KRAFT**

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

Orientador

Prof. DSc. Gustavo Henrique Denzin Tonoli

Coorientadora

Prof.^a DSc. Barbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira

**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).**

Satiro, Jhonatan Sales.

Compósitos de gesso reforçados com resíduos lignocelulósicos
e micro/nanocelulose kraft / Jhonatan Sales Satiro. - 2024.

55 p.

Orientador(a): Gustavo Denzin Tonoli.

Coorientador(a): Barbara Guimarães Oliveira.

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

Bibliografia.

1. Micro/nanocelulose. 2. Nanotecnologia. 3. Resíduos. I.
Tonoli, Gustavo Denzin. II. Oliveira, Barbara Guimarães. III.
Título.

JHONATAN SALES SATIRO

**COMPÓSITOS DE GESSO REFORÇADOS COM RESÍDUOS
LIGNOCELULÓSICOS E MICRO/NANOCELULOSE KRAFT**

**GYPHUM COMPOSITES REINFORCED WITH MICRO/NANOCELLULOSE AND
LIGNOCELLULOSIC WASTE FROM KRAFT TUBES**

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 Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 19 de agosto de 2024.

DSc. Gustavo Henrique Denzin Tonoli UFLA

DSc. Barbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira UFLA

Orientador

Prof. DSc. Gustavo Henrique Denzin Tonoli

Coorientadora

Prof.^a DSc. Barbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira

**LAVRAS – MG
2024**

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”.

George Shaw

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que com sua paz e amor me concedeu forças e o dom da vida, e que por toda minha trajetória me abençoou, iluminou e trilhou meu caminho.

Aos meus pais, Ari Satiro e Maria Aparecida Sales Satiro, por me permitirem sempre correr atrás dos meus sonhos e abrirem portas para o meu futuro, por mostrarem que sou capaz de ir além das minhas expectativas, por todo esforço, amor, carinho e dedicação.

A minha irmã Jacheline Sales Satiro Sousa pelo amor e carinho, nos momentos difíceis enfrentados, ao meu maior presente de Deus, meu afilhado Miguel Vitor Satiro Sousa que por ele vem minha fonte inesgotável de forças e estímulos para que me torne uma imagem e referência para seu futuro.

Aos colegas e técnicos que compartilharam da minha trajetória e apoiaram o desenvolvimento da pesquisa, em especial, MSc. Ianca Oliveira Borges, Dra. Evelize Aparecida Amaral, MSc. André Tetsuo Shashik, Dr. Rafael Carvalho do Lago, Dra. Barbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira, Dr. Lorrán de Sousa Arantes, MSc. Marisa Aparecida Pereira, MSc. Karini de Lourdes Silva Mesquita, MSc. Agatha Stefani Nunes e Pamela Fernandes Ribeiro.

À MSc. Ianca Oliveira Borges que de maneira indireta pode me coorientar, paciência, o estímulo, a camaradagem e o comprometimento, bem como as valiosas lições que proporcionaram, foram fundamentais para concluir este projeto e impulsionar meu desenvolvimento profissional.

Ao meu orientador Dr. Gustavo Henrique Tonoli, por todo apoio, amizade e incentivo a sempre pesquisar e seguir em frente.

À Dra. Barbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira pela coorientação, por todo apoio, ensino, pelo incentivo e paciência.

Ao Laboratório de Nanotecnologia Florestal, Laboratório de Compósitos Lignocelulósicos, a Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) do Departamento de Ciências Florestais, Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras, e a Finep, Fapemig, CNPq e Capes pelo fornecimento dos equipamentos e suporte técnico para experimentos, que colaboraram diretamente ou indiretamente na execução deste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Biomateriais (BIOMAT), pela oportunidade concedida para realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos meus pais Maria Aparecida Sales Satiro e Ari Satiro amo vocês incondicionalmente.

RESUMO

Elementos construtivos de gesso são atrativos na construção civil por seu rápido endurecimento, resistência ao fogo e eficiência acústica e térmica. Contudo, devido à sua porosidade e baixa eficiência mecânica, o uso do gesso é geralmente limitado a interiores. Para melhorar essas propriedades, é necessária a adição de reforços, como fibras. As fibras para reforço podem ser obtidas de diversas fontes, inclusive de resíduos industriais, o que vai ao encontro do conceito de logística reversa. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de resíduo lignocelulósico industrial e micro/nanofibrila de celulose proveniente de tubo de papel kraft em compósitos a base de gesso. O delineamento consistiu na incorporação de reforço do material lignocelulósico tanto *in natura* quanto em nanoescala nas proporções de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% do material *in natura* e nas proporções de 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% e % do material em nanoescala para substituição do gesso. Os corpos de prova foram avaliados quanto às propriedades de absorção de água, massa específica aparente, ensaio mecânico à flexão e propriedades térmicas. Houve um incremento de 10% no aumento de absorção de água em compósitos com resíduos e 87% de aumento em nanocompósitos e massa específica aparente com o aumento dos reforços na matriz. Os compósitos com a incorporação se mostraram positivos para a condutividade térmica. Quanto à resistência à flexão houve decréscimo com a incorporação dos reforços, mas ainda aceito pela normativa. A caracterização do gel de micro/nanocelulose obtido do resíduo de tubo avaliou estabilidade, reologia e distribuição de diâmetro. A reutilização desse resíduo de tubo de papel kraft em compósitos de gesso mostrou ser uma alternativa viável para sua incorporação na matriz, além da logística reversa em reutilizar um material que seria descartada no meio ambiente de maneira inadequada, proporcionando diversos impactos negativos, demonstrando novas possibilidades de uso do material

Palavras-chave: propriedades físicas e mecânicas; condutividade térmica; micro/nanocelulose; construção civil; nanotecnologia.

ABSTRACT

Constructive gypsum elements are attractive in civil construction due to their rapid hardening, fire resistance, and acoustic and thermal efficiency. However, due to its porosity and low mechanical efficiency, gypsum use is generally limited to interiors. To improve these properties, reinforcement, such as fibers, is necessary. Reinforcing fibers can be obtained from various sources, including industrial waste, which aligns with the concept of reverse logistics. In this context, the general aim of this study was to evaluate the effect of adding industrial lignocellulosic waste and micro/nanocellulose fibrils derived from kraft paper tubes in gypsum-based composites. The design included incorporating the lignocellulosic material reinforcement in both raw and nanoscale forms at proportions of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% of the raw material and proportions of 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, and 1% of the nanoscale material as a gypsum substitute. The specimens were evaluated for water absorption, apparent density, flexural mechanical strength, and thermal properties. A 10% increase in water absorption was observed in composites with residues and an 87% increase in nanocomposites, along with an increase in apparent density with higher reinforcement in the matrix. The composites with this incorporation were favorable for thermal conductivity. Flexural strength showed a decrease with reinforcement incorporation but remained within acceptable standards. The characterization of the micro/nanocellulose gel obtained from the tube waste assessed stability, rheology, and diameter distribution. The reuse of this kraft paper tube waste in gypsum composites proved to be a viable alternative for incorporation into the matrix, contributing to reverse logistics by reusing a material that would otherwise be improperly discarded in the environment, causing various negative impacts and demonstrating new potential applications for the material.

Keywords: physical and mechanical properties; thermal conductivity; micro/nanocellulose; civil construction; nanotechnology.

INDICADORES DE IMPACTO

Os elementos construtivos à base de gesso apresentam vantagens como rápido endurecimento, resistência ao fogo e eficiência acústica e térmica, mas possuem limitações devido à sua porosidade e baixa resistência mecânica, restringindo seu uso a ambientes internos. Para superar essas limitações, este estudo avaliou a incorporação de resíduos lignocelulósicos industriais e micro/nanofibrilas de celulose provenientes de tubos de papel kraft em compósitos de gesso, considerando suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Os resultados demonstraram que a incorporação desses reforços promoveu um aumento na absorção de água, atingindo até 87% em nanocompósitos, e na massa específica aparente, além de uma melhoria na condutividade térmica. Apesar da redução na resistência à flexão, os valores permaneceram dentro dos limites normativos, indicando viabilidade estrutural. A reutilização desses resíduos industriais reforça o conceito de logística reversa, reduzindo impactos ambientais associados ao descarte inadequado e promovendo a economia circular na construção civil. No contexto social e econômico, a adoção dessa tecnologia pode incentivar práticas mais sustentáveis no setor, fomentar a valorização de resíduos como insumos para novos materiais e estimular a geração de renda em setores ligados à reciclagem e ao aproveitamento de subprodutos industriais. Os impactos tecnológicos incluem a possibilidade de desenvolvimento de novos compósitos de gesso com propriedades otimizadas para diferentes aplicações, contribuindo para a diversificação de materiais na construção civil e incentivando a pesquisa e inovação em materiais sustentáveis. A viabilidade da substituição parcial do gesso por reforços lignocelulósicos e micro/nanofibrilas de celulose provenientes de resíduos demonstra um potencial significativo para a redução do consumo de recursos naturais e para a mitigação dos impactos ambientais do setor, promovendo um modelo produtivo mais alinhado com princípios de sustentabilidade e economia circular. O presente trabalho investigou a incorporação de resíduo lignocelulósico industrial e micro/nanofibrilas de celulose provenientes de tubos de papel kraft em compósitos de gesso, visando melhorar suas propriedades físicas e térmicas. Os impactos sociais, tecnológicos, econômicos e ambientais do estudo apresentam tanto caráter concreto quanto potencial, com relevância para diferentes setores da sociedade. Do ponto de vista tecnológico, os resultados indicaram a viabilidade da substituição parcial do gesso por reforços lignocelulósicos, contribuindo para o avanço de materiais sustentáveis na construção civil. A melhoria na condutividade térmica e a manutenção da resistência mecânica dentro dos padrões normativos demonstram potencial para aplicações em revestimentos e divisórias,

promovendo eficiência energética e menor consumo de materiais convencionais. No âmbito social e econômico, a utilização de resíduos industriais para reforço do gesso fortalece o conceito de logística reversa e economia circular, reduzindo desperdícios e fomentando a valorização de resíduos como insumos para novos materiais. Essa abordagem pode gerar oportunidades para setores ligados à reciclagem e reaproveitamento de subprodutos industriais, impactando diretamente trabalhadores e empresas desse segmento. Além disso, ao promover a sustentabilidade na construção civil, o trabalho pode incentivar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento de materiais ecologicamente corretos e ao estímulo à inovação em indústrias do setor. O impacto ambiental do estudo é significativo, pois a reutilização de resíduos industriais reduz a quantidade de material descartado de maneira inadequada, minimizando impactos negativos ao meio ambiente. Esse aspecto alinha-se ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12 da Organização das Nações Unidas (ONU), que trata do consumo e produção responsáveis, bem como ao ODS 9, que incentiva a inovação e infraestrutura sustentável. No contexto da Política Nacional de Extensão, os impactos do trabalho se inserem principalmente na área temática de tecnologia e produção, ao desenvolver novos materiais e processos para a construção civil, e também no meio ambiente, ao propor alternativas sustentáveis para a destinação de resíduos industriais. Em relação à extensão universitária, o trabalho tem potencial para beneficiar setores produtivos externos à Universidade Federal de Lavras (UFLA), incluindo indústrias de papel e celulose, empresas da construção civil e cooperativas de reciclagem. Embora os impactos diretos sobre comunidades específicas ainda estejam em fase de estudo, a implementação de compósitos sustentáveis pode futuramente gerar benefícios concretos, como a redução do custo de produção de materiais de construção e o incentivo à adoção de práticas sustentáveis no setor.

IMPACT INDICATORS

Gypsum-based construction elements offer advantages such as rapid hardening, fire resistance, and acoustic and thermal efficiency. However, they have limitations due to their porosity and low mechanical strength, restricting their use to indoor environments. To overcome these limitations, this study evaluated the incorporation of industrial lignocellulosic waste and micro/nanocellulose fibrils derived from kraft paper tubes into gypsum composites, considering their physical, mechanical, and thermal properties. The results showed that the incorporation of these reinforcements led to an increase in water absorption, reaching up to 87% in nanocomposites, and in apparent specific mass, in addition to an improvement in thermal conductivity. Despite the reduction in flexural strength, the values remained within normative limits, indicating structural feasibility. The reuse of these industrial residues reinforces the concept of reverse logistics, reducing environmental impacts associated with improper disposal and promoting a circular economy in the construction industry. In the social and economic context, the adoption of this technology can encourage more sustainable practices in the sector, promote the valorization of waste as raw material for new materials, and stimulate income generation in sectors related to recycling and the reuse of industrial byproducts. Technological impacts include the potential development of new gypsum composites with optimized properties for different applications, contributing to the diversification of materials in construction and encouraging research and innovation in sustainable materials. The feasibility of partially replacing gypsum with lignocellulosic reinforcements and micro/nanocellulose fibrils derived from waste demonstrates significant potential for reducing natural resource consumption and mitigating the environmental impacts of the sector, promoting a production model more aligned with sustainability and circular economy principles. This study investigated the incorporation of industrial lignocellulosic waste and micro/nanocellulose fibrils derived from kraft paper tubes into gypsum composites to improve their physical and thermal properties. The social, technological, economic, and environmental impacts of the study present both concrete and potential characteristics, with relevance to different sectors of society. From a technological standpoint, the results indicated the feasibility of partially replacing gypsum with lignocellulosic reinforcements, contributing to the advancement of sustainable materials in construction. The improvement in thermal conductivity and the maintenance of mechanical strength within normative standards demonstrate potential for applications in coatings and partitions, promoting energy efficiency and reduced consumption of conventional materials. In the social and economic sphere, the use of industrial waste to

reinforce gypsum strengthens the concept of reverse logistics and circular economy, reducing waste and fostering the valorization of residues as raw materials for new products. This approach can create opportunities for sectors involved in recycling and the reuse of industrial byproducts, directly impacting workers and companies in this segment. Additionally, by promoting sustainability in the construction industry, this work can encourage public policies aimed at developing environmentally friendly materials and stimulating innovation in the industrial sector. The environmental impact of the study is significant, as the reuse of industrial waste reduces the amount of improperly discarded material, minimizing negative impacts on the environment. This aspect aligns with the United Nations (UN) Sustainable Development Goal (SDG) 12, which addresses responsible consumption and production, as well as SDG 9, which encourages innovation and sustainable infrastructure. In the context of the National Extension Policy, the impacts of this work mainly fall under the thematic area of technology and production, by developing new materials and processes for the construction industry, and also under the environmental category, by proposing sustainable alternatives for industrial waste disposal. Regarding university extension, the study has the potential to benefit external productive sectors to the Federal University of Lavras (UFLA), including paper and cellulose industries, construction companies, and recycling cooperatives. Although direct impacts on specific communities are still under study, the implementation of sustainable composites may generate concrete future benefits, such as reducing the cost of building material production and encouraging the adoption of sustainable practices in the sector.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO	19
3.1 Gesso na construção civil	19
3.2 Compósitos	20
3.2.1 Classificação dos compósitos	21
3.3 Resíduos industriais e os materiais lignocelulósicos	22
3.4 Nanotecnologia	24
3.5 Obtenção de Micro/nanofibrila de celulose de papel	25
3.6 Comentários finais sobre a revisão bibliográfica	26
COMPÓSITOS DE GESSO REFORÇADOS COM RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS E MICRO/NANOCELULOSE KRAFT	30
1. Introdução	31
2. Materiais e métodos	33
2.1 Matéria-prima	33
2.2 Caracterização química estrutural	33
2.3 Produção da micro/nanofibrila de celulose – MFC/NFC	34
2.4 Caracterização da Micro/nanofibrila de Celulose	34
2.4.1 Estabilidade das suspensões	34
2.4.2 Reologia	35
2.4.3 Análise de demanda iônica	35
2.4.4 Microestrutural - Microscópio Eletrônico de Varredura	35
2.5 Produção dos compósitos e nanocompósitos	36
2.6 Caracterização dos compósitos	36
2.6.1 Análises físicas e mecânicas	36
2.6.2 Isolamento térmico	37
2.6.3 Microestrutural	38
2.7 Análise estatística	38
3. Resultados e discussões	38
3.1 Caracterização química estrutural	38
3.2 Análises da Micro/Nanocelulose	40

3.2.1	Estabilidade das suspensões	40
3.2.2	Reologia	42
3.3	Análises dos compósitos e nanocompósitos.....	43
3.3.1	Massa específica e absorção de água	43
3.3.2	Propriedades mecânicas	46
3.4	Condutividade térmica	49
4	Conclusão	50
5	Conclusão DA DISSERTAÇÃO E SUGESTÕES DE ESTUDOS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novos materiais e o crescimento populacional, com destaque para a área da tecnologia e inovação, surge a preocupação e a necessidade de estudar a incorporação de resíduos industriais para obtenção de produtos com menor impacto ambiental, novas propriedades, viabilidade econômica e maior resistência (SALEEM et al., 2021). Neste sentido, a nanotecnologia se destaca em diversas áreas, como na construção civil, com os nanocompósitos. Setor em ascensão que está empregando o uso da nanotecnologia e se consolidando no mercado (BARBOSA et al., 2017). Além disso, desenvolver estudos e investigar o potencial de materiais em nanoescala permite melhorar propriedades físicas e mecânicas de diversos materiais na construção civil. (FECHINE, 2020).

Para desenvolver novos materiais em escala nanométrica, a utilização de resíduos lignocelulósicos se apresenta como uma opção viável e interessante para a confecção de compósitos, a fim de desenvolver qualidades e propriedades únicas para o produto. Os materiais lignocelulósicos destacam-se no mercado devido ao baixo custo, alta disponibilidade, baixa toxicidade, baixa densidade, fácil interação interface matriz e reforço, reciclabilidade, biodegradabilidade e baixa emissão de poluentes, sendo adequados em matrizes como o gesso (MACVICAR, MATUANA, BALATINECZ, 1999; SOYKEABKAEW et al. 2009).

Dentre os compósitos cerâmicos, o gesso se destaca pelas suas propriedades atrativas, como endurecimento acelerado, baixa retração na secagem, boa aderência na interface, compatibilidade com as propriedades mecânicas solicitadas, acabamento superficial e propriedades acústicas (SOUSA, 2020). No entanto, apesar das características positivas, o gesso apresenta limitações para sua aplicação na construção civil, como fragilidade, baixa tenacidade, material hidrofílico e degradação acelerada, sendo necessária a busca por materiais de reforço para melhorar algumas dessas particularidades (Del Rio-Merirno et al., 2022).

A inclusão de resíduos lignocelulósicos e de nanoaditivos como reforço na matriz de gesso tem se mostrado promissora, intensificando seus benefícios e resultados. A literatura destaca a incorporação de diversos reforços na matriz de gesso, como fibras de palmeira (BRAIEK et al., 2017), cinzas de carvão vegetal (SOUZA, 2020), papel Kraft e fibras de bananeira (NORORNHA, 2014), partículas de resíduos lignocelulósicos (VILLELA, 2017), fibras de basalto, têxteis, fibra de vidro, acrílicas, de sisal e de banana (SILVA et al., 2014), bem como a incorporação de nanomateriais para a confecção de nanocompósitos, como

nanotubos de carbono (VILLELA, 2022), nano-sílica (LI et al., 2021) e nanofibrila de celulose (Tokarev et al., 2017).

A incorporação de diferentes materiais como reforço não só visa a sustentabilidade, mas também contribui para o desenvolvimento de materiais com propriedades novas ou melhoradas. O uso de nanofibrila de celulose atenção é relevante na área de materiais compósitos devido à sua ampla disponibilidade e biocompatibilidade (KUMAR; MISHRA et al., 2018). De acordo com Mesquita (2013), a utilização de partículas lignocelulósicas apresenta potencial de uso como elemento de reforço em compósitos.

O resíduo de tubo de papel Kraft é outro material que pode ser utilizado como reforço na matriz de gesso, sendo uma alternativa viável para a sua reutilização na construção civil após o descarte, contribuindo para a valorização dos resíduos. (DIAS, SALADO, 2020; DIAS, SALADO, 2021).

Diante disso, o objetivo da pesquisa foi investigar e avaliar a incorporação do resíduo lignocelulósicos (tubo de papel Kraft) in natura e em escala nanométrica como reforço em compósitos de gesso, visando a produção de novos materiais e a valorização dos resíduos.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho de compósitos de gesso reforçados com celulose micro/nanofibrilada e resíduos lignocelulósicos provenientes de tubos de papel Kraft, por meio de uma análise física e mecânica abrangente, buscando compreender as propriedades e o potencial de aplicação desses materiais na indústria da construção civil. Para isso, foi realizada uma revisão da literatura para embasar e fundamentar a pesquisa.

Objetivos específicos:

Caracterizar e avaliar o material in natura e as micro/nanoceluloses produzidas a partir dos resíduos de tubos de papel Kraft.

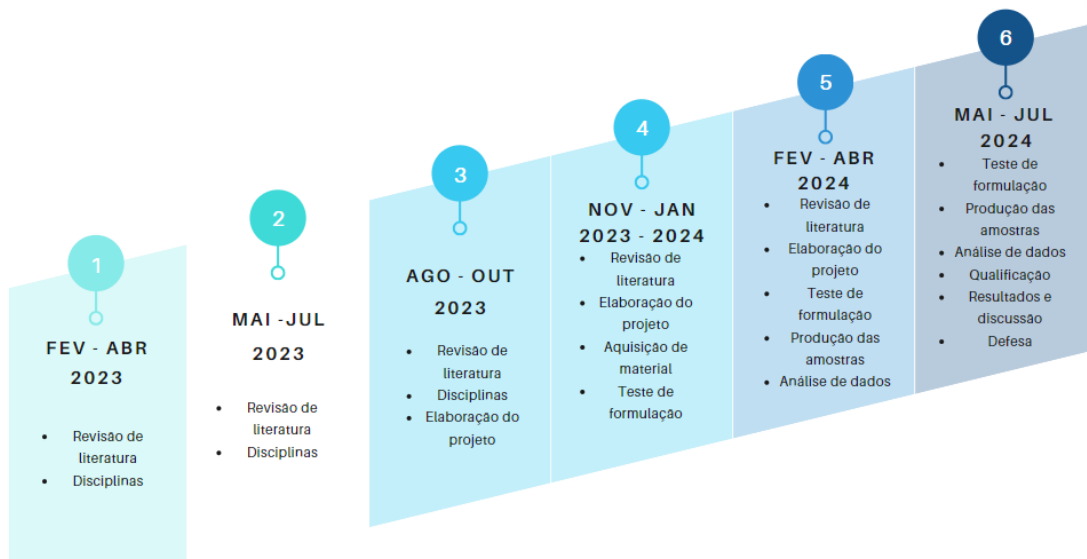
Produzir e avaliar as propriedades físicas, como absorção de água, densidade e porosidade; propriedades mecânicas, incluindo flexão e compressão; propriedades acústicas em relação a condutibilidade térmica; e propriedades microestruturais, como a microscopia de compósitos de matriz de gesso, utilizando como reforço resíduo lignocelulósico in natura a base de tudo de papel kraft em concentrações de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%

Caracterizar a solução MFC/NFC produzida a partir dos resíduos de tubo de papel kraft

• Planejamento Experimental da Dissertação

A seguir, a Figura 1. representa o cronograma desenvolvido para o desenvolvimento dos conteúdos presentes na dissertação, as etapas e os processos de confecção.

Figura 1. Cronograma das etapas para realização da dissertação.



Fonte: Do Autor (2024).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Gesso na construção civil

A indústria da construção civil desempenha um papel significativo na extração dos recursos naturais, resultando em um aumento considerável na quantidade de resíduos gerados. O gesso, obtido a partir da gipsita, é amplamente utilizado na produção do hemidrato beta, material comumente empregado em construções (BALTAR, FERRAZ, SANTOS, 2014).

Com a crescente preocupação com os impactos ambientais, há um aumento na atenção voltada para a geração e o descarte inadequado dos resíduos provenientes da produção de materiais. Assim a redução desses impactos torna-se crucial, destacando a importância da busca por alternativas que visem à redução de poluentes e à prevenção do meio ambiente (LIMA, CABRAL, 2013).

A norma NBR 13207 (ABNT, 2017) regulariza a utilização de gesso na construção civil no Brasil, sendo classificado quanto a sua granulometria, utilização, fundição (tipo A), revestimento (tipo B) e tempo de ação (rápido, lento). Como apresentado na Tabela 1, os valores referentes às exigências da norma.

Tabela 1. Normatização para uso de gesso na construção civil.

Requisitos físicos e mecânicos		
Ensaio	Unidade	Limite
Massa Unitária	g/cm ³	≥ 600,0
Dureza	MPa	≥ 20,0
Aderência	MPa	≥ 0,2
Requisitos físicos (tempo de pega)		
Ensaio	Tempo de pega (min)	
	Início	Fim
Gesso para fundição	≤ 10	≤ 20
Gesso para revestimento (sem aditivos)	≥ 10	≥ 35
Gesso para revestimento (com aditivos)	≥ 4	≥ 50
Requisitos físicos (granulometria via seca)		
Classificação do gesso	Granulometria mínima	
Gesso para fundição	(peneira abertura 0,29mm) ≥ 90% passante	
Gesso para revestimento	(peneira abertura 0,21mm) ≥ 90% passante	
Requisitos químicos do gesso sem aditivos		
Determinações químicas	Limites (%)	
Água livre	Máx. 1,3	
Água de cristalização	4,2 a 6,2	
Óxido de cálcio (CaO)	Mín. 38,0	
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	Mín. 53,0	

Fonte: Do Autor (2024).

O uso de gesso do Tipo A (fundição) é empregado para a confecção de chapas acartonadas, blocos e placas convencionais, enquanto o gesso para revestimento (Tipo B) é indicado para revestir paredes e tetos em ambientes internos e secos, podendo substituir rebocos e massas de acabamento (FERREIRA, 2017). Com esses materiais, é possível obter diversos coprodutos, como paredes divisórias e rebaixamento de teto (BALTAR, BASTOS, BORGES, 2004).

O gesso possui a capacidade de endurecer e cristalizar em contato com a água. Uma vez que endurece, torna-se um material hidrofílico, devido à sua alta solubilidade. No entanto, apresenta características que podem oferecer propriedades significantes para a construção civil, como o equilíbrio da umidade relativa do ar em ambientes fechados, além de propriedades acústicas e térmicas desejáveis (FERREIRA, 2017).

3.2 Compósitos

Com o crescimento populacional e a crescente preocupação com os problemas ambientais, o mercado está cada vez mais exigente e intensificando o desenvolvimento de compósitos (FARUK et al., 2012). Segundo Callister (2018), os compósitos são compostos por um sistema de duas ou mais fases de materiais e estruturas distintas, separadas por interfaces, apresentando propriedades superiores às encontradas de forma isolada em sua composição, com uma fase sendo a matriz e a outra o reforço.

Os compósitos podem ser classificados como naturais ou artificiais e, que como destaca Ínsita Neto e Pardini (2006), abrangem desde polímeros reforçados com fibras até concretos estruturais e compósitos que incorporam na matriz materiais metálicos ou cerâmicos, podendo ser subdividido de acordo com o tipo de matriz, reforço e arranjo estrutural.

A matriz é a fase contínua de um compósito, essencial para manter a coesão das fibras ou cargas, protegê-las do meio envolvente, evitar danos durante o seu manuseio, distribuir o carregamento pelas fibras e redistribuí-lo em caso de fissura (ALMEIDA, 2017).

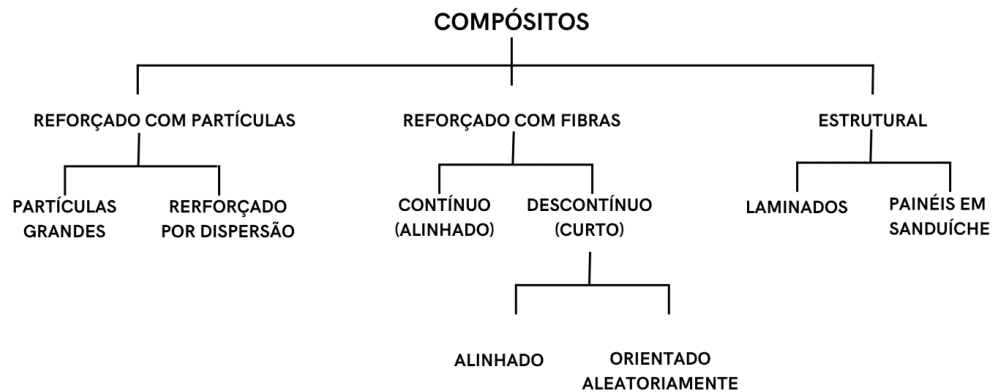
Já o reforço, que possui elevada resistência e rigidez, é envolvido pela matriz, mantendo as fibras em sua posição geométrica, transferindo tensão pelo componente e garantindo resistência química. Os materiais compósitos são amplamente utilizados em diversas áreas, como nas indústrias automotiva, aeronáutica, esportiva, construção e arquitetura. Existem diferentes processos de fabricação, variando de acordo com o tipo de aplicação, taxa de

produção e tamanho dos componentes (RAGONDET, 2005). De acordo com Marinucci (2011), os compósitos reforçados por fibras estão diretamente relacionados às funções dos elementos constituintes dos materiais, como tamanho, interação química, geometria, concentração, orientação e disposição das fibras, além da adesão fibra/matriz.

3.2.1 Classificação dos compósitos

De acordo com Schiontek e Koide (2019) em decorrência dos tipos e arranjos de reforços existentes, os materiais compósitos podem ser classificados em duas grandes áreas: reforço fibroso e reforço particulado. Dessa forma, as fibras atuando como reforço podem ser ordenadas de modo a ficarem dispostas paralelas entre si, formando orientações em multidireções, multicamadas, isoladas ou em lâminas, e subdividindo-se entre compósitos de fibras contínuas ou fibras curtas (CALLISTERS, 2018). A Figura 2 demonstra a classificação de compósitos e suas subdivisões.

Figura 2. Classificação dos compósitos.



Fonte: Adaptado de Callister (2018).

Embora os compósitos de fibras contínuas possuam propriedades mecânicas elevadas, os compósitos de fibras curtas oferecem maior facilidade de processamento e baixo custo de produção. Dessa forma, devido à sua distribuição na matriz do compósito, as fibras geram pontos concentradores de tensão em suas extremidades, o que tende a induzir ao cisalhamento em sua interface matriz/reforço. (SILVA, 2003) A busca pelo desenvolvimento

de materiais compósitos ocorre por dois motivos principais: interesse econômico e desempenho comercial (SANTOS, 2020).

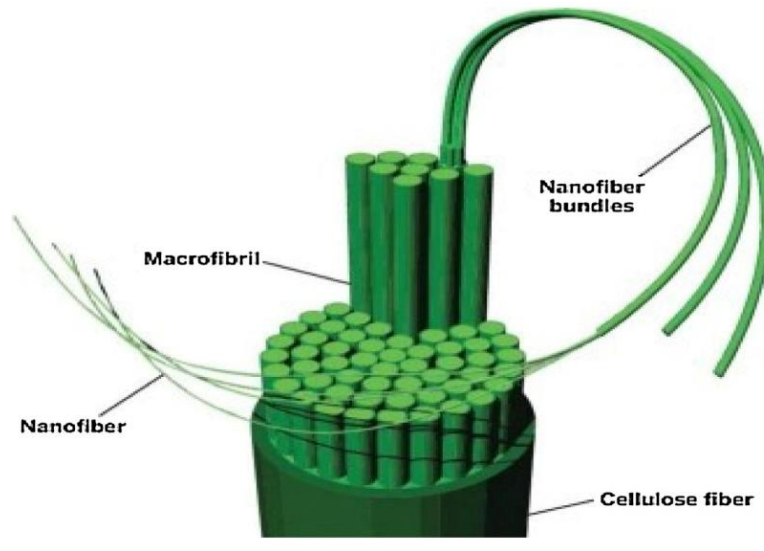
É possível que ocorra a produção natural de materiais compósitos, como madeira e osso, além dos sintéticos, que são produzidos pelo homem. Portanto, é de suma importância estudar a produção de compósitos, focando em alcançar propriedades melhoradas e similares aos comerciais, com apelo ambiental e sustentabilidade no processo e produto final (CALLISTER, 2018).

3.3 Resíduos industriais e os materiais lignocelulósicos

A rápida expansão populacional e o crescimento desordenado da industrialização têm gerado impactos negativos ao meio ambiente, principalmente através da geração de resíduos, tornando-se uma preocupação crescente para pesquisadores em todo o mundo. Dessa forma o objetivo é encontrar soluções para essa questão e diminuir a quantidade de resíduos lignocelulósicos, transformando-os em fontes de materiais renováveis e biodegradáveis (KUMAR et al., 2019).

Os materiais lignocelulósicos são compostos por celulose, hemicelulose e lignina, e podem ser encontrados em diversos recursos, incluindo resíduos de madeira, papel, gramíneas, resíduos agrícolas e da indústria alimentícia (Bilal et al., 2017). De acordo com Kumar et al. (2019), a celulose se destaca como um material lignocelulósico promissor devido às suas características de biocompatibilidade, biodegradabilidade e renovabilidade. A celulose é o biopolímero mais abundante do planeta, com elevado peso molecular, e é formada por feixes de micro/nanofibrilas, como ilustrado na Figura 3.

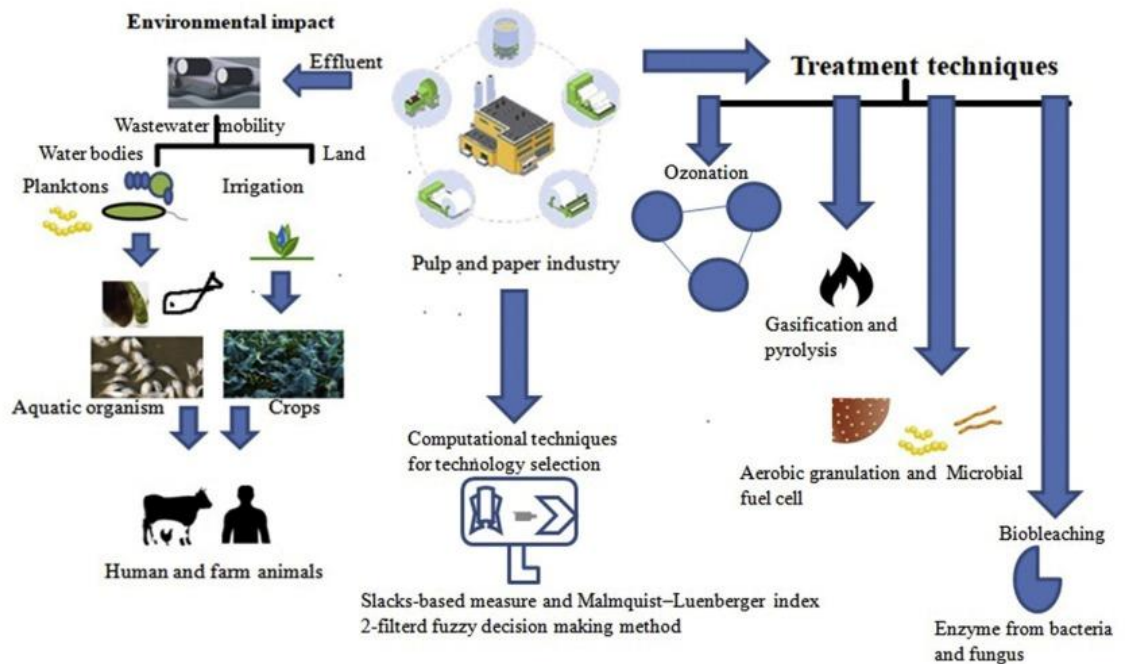
Figura 3. Estrutura hierárquica da fibra da celulose



Fonte: Adaptado Delgado – aguila et al. (2015).

A indústria de papel e celulose está entre as empresas que mais crescem e se desenvolvem. Dessa forma, para atender à grande demanda por papel, essas indústrias acabam gerando altas quantidades de poluentes e consumindo grandes quantidades de energia e água do planeta (VELUCHAMY, KALAMDHAD, 2017). Como consequência, quantidades alarmantes de água cinza, resíduos sólidos e proliferação de resíduos gasosos são produzidos nesse setor. De acordo com Gupta et al. (2019), o problema surge durante o processo de fabricação de celulose e papel, especialmente no branqueamento da celulose, o qual gera resíduos sólidos e águas residuais. Além disso, é importante destacar que esses resíduos podem ter um impacto significativo no ecossistema, como mostra a Figura 4, sendo essencial a adoção de técnicas de tratamento adequadas para minimizar esses impactos.

Figura 4. Representação esquemática do efeito dos resíduos de celulose e papel



Fonte: Mandeep et al. (2019).

Diversos tipos de resíduos de papel podem ser encontrados, como embalagens de papelão, tubos de papel Kraft, jornais, revistas e resíduos de escritórios (TSATSIS et al., 2017). O papel é um dos materiais com maior fonte celulósica reciclável, podendo ser processado e reciclado de 3 a 4 vezes, chegando até 7 vezes, em média, de acordo com Zhang et al. (2015b). Apesar dos benefícios do processo de reciclagem, especialmente em termos ecológicos, a resistência das fibras de papel diminui a cada ciclo de reciclagem, devido a fatores como encurtamento, ligação (inter e intra) e composição química das fibras (CHEN et al., 2016b).

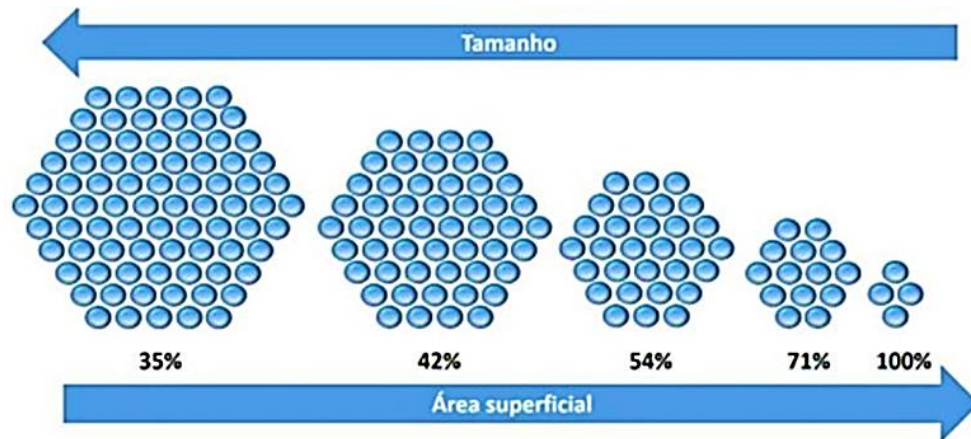
3.4 Nanotecnologia

A nanotecnologia, conforme descrito por Saleem et al. (2021), envolve o estudo e desenvolvimento de materiais em escala molecular e atômica dentro de um feixe de 1nm a 100nm, permitindo explorar propriedades mecânicas, térmicas e eletrônicas, que são alteradas devido à redução de dimensões, área superficial e volume dos materiais, possibilitando diversas outras aplicações (THOSTENSON et al., 2008).

Durante o processo de produção, as propriedades físicas e químicas dos materiais sofrem mudanças devido à redução de escala e aumento da área superficial (FECHINE, 2020). Isso faz que os nanomateriais apresentem um número maior de átomos em sua superfície, aumentando a capacidade de interagir com íons e átomos de outras substâncias (DEREVIANKO,

KONDRATIEVA, HRYSHKO, 2018). A Figura 5 ilustra como redução da escala e área superficial afeta a quantidade de átomos presentes.

Figura 5. Relação entre tamanho e área superficial de nanomateriais



Fonte: Fachine (2020).

De acordo com Jeevanandam et al. (2018), os nanomateriais têm sido amplamente utilizados em uma variedade de produtos do cotidiano, como tintas, adesivos da indústria moveleira, medicamentos e filtros solares. Segundo Pisarenko, Ivanov e Wang (2020), o aumento nas pesquisas na área da nanotecnologia, tem gerado um maior interesse em sua aplicação, levando à melhoria das propriedades como resistência, hidrofobicidade, resistência ao fogo e revestimentos arquitetônicos (ZHENG et al., 2019; DAHLAN et al., 2019).

3.5 Obtenção de Micro/nanofibrila de celulose de papel

A obtenção de micro/nanofibrila de celulose à partir de resíduos de papel ainda se encontra em constante inovação. De acordo com Kumar et al. (2020), a micro/nanocelulose produzida a partir desses resíduos é comparável à provenientes de fontes de celuloses tradicionais, sendo utilizada para diversos fins e aplicações industriais. Existem diferentes métodos para obter as micro/nanocelulose, como processos mecânicos ou químicos, sendo o processo mecânico realizado através da desfibrilação das fibras (NECHYPORCHUK et al., 2015).

Diversos tipos de materiais podem ser produzidos a partir da desfibrilação das fibras, incluindo a microfibrila de celulose e nanofibrila de celulose (KUMAR et al., 2020).

Estudos têm demonstrado o isolamento da micro/nanocelulose a partir de fontes de celulose não convencionais, como cartão de papel de caixa de leite (Suopajarvi et al., 2017) e resíduos de jornal (Josset et al., 2014)..

O uso de resíduos de papel é uma excelente alternativa para a produção de nanocelulose, promovendo uma rota mais sustentável e reciclagem do material. No entanto, o principal desafio é purificar adequadamente o resíduo de papel devido à presença de reagentes utilizados em sua fabricação, havendo a necessidade da segregação adequada dos resíduos de papel desde sua origem, conforme apontado por Kumar et al. (2020).

Apesar dos desafios, os resultados obtidos na produção de nanocelulose a partir de resíduos de papel se equiparam aos obtidas de fontes tradicionais, indicando um potencial interesse na utilização como reforço para nanocompósitos.

3.6 Comentários finais sobre a revisão bibliográfica

O referencial teórico apresentado anteriormente ofereceu informações essenciais para conceituar e aprofundar a compreensão sobre o uso de gesso, a importância do desenvolvimento de materiais compósitos, a interação e interface fibra/matriz, resíduos lignocelulósicos, nanotecnologia, nanocompósitos e suas possíveis aplicações. Os tópicos abordados foram fundamentais para embasar a pesquisa e a metodologia utilizada.

Fica evidente que a utilização de fibras e nanomateriais para aprimorar as propriedades físicas e mecânicas é um fator determinante. Reconhecer as limitações da matriz de gesso é crucial para explorar esses materiais como fonte para atender as necessidades e gerar potenciais produtos inovadores. Assim, o objetivo desta pesquisa é investigar e avaliar contribuições que possam agregar conhecimentos técnicos e científicos para o campo da nanotecnologia e compósitos de matriz de gesso, empregando resíduos lignocelulósicos e micro/nanofibrilas de celulose no produto final.

REFERÊNCIAS

- ANTUNES, A., FARIA, P., SILVA, V. et al., “Rice husk-earth based composites: A novel bio-based panel for buildings refurbishment,” *Construction and Building Materials*, v. 221, pp. 99-108, 2019.
- BALTI, S., BOUDENNE, A., DAMMAK, L., et al., “Mechanical and thermophysical characterization of plaster composites reinforced by different wastes for green building applications”, *Construction & Building Materials*, v. 372, pp. 130840, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130840>
- BARBOSA, W. P.; VANDERLEI, R. D; CALLEFI; M. H. B. M.; SAKUNO, F. S.; BARBOSA, L. P., CAPELIN, L. J. A Nanotecnologia na construção civil e suas influências. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 10., 2017, Campinas. Anais [...] Campinas, Galoá, 24 a 26 de outubro de 2017.
- BHATIA, L., JOHRI, S., AHMAD, R. An economic and ecological perspective of ethanol production from renewable agro waste: a review, *AMB Express*, v. 2, n. 1, p. 65, 2012.
- CALLISTER, W. D. J. e RETHWISCH, D. G.. *Materials science and engineering: an introduction*, 8o ed. 2015.
- CHEN, Y., Wan, J., Wu, Q., Ma, Y., Huang, M., 2016b. Effect of recycling on fundamental properties of hardwood and wheat straw pulp fibers, and of handsheets made thereof. *Cellul. Chem. Technol.* 50 (9–10), 1061–1067.
- Delgado-Aguilar, M., Tarrés, Q., Pèlach, M.A., Mutjé, P., Fullana-i-Palmer, P., 2015. Are cellulose nanofibers a solution for a more circular economy of paper products? *Environ. Sci. Technol.* 49 (20), 12206–12213.
- DEREVIANKO, V.; KONDRATIEVA, N.; HRYSHKO, H. Study of impact factors and the mechanism of gypsum binder hydration process in the presence of nanomodifiers. *FrenchUkrainian Journal of Chemistry*, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 92–100, 2018.
- EUROPEAN COMITTE OF STANDARDIZATION, EN 13279-2: Plaster binders and plaster plasters. Part 2: Test methods, Bruxelas, CEN, 2006.
- EUROPEAN COMITTE OF STANDARDIZATION, EN 520. Plaster plasterboards. Definitions, requirements and test methods, Bruxelas, CEN, 2004.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, CEN, EN 13279-1, Gesso e produtos à base de gesso para a construção; Parte 1: Definições e requisitos, Bruxelas, 2008.
- FARUK O., BLEDZKI A.K., FINK H-P, SAIN M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Prog Polym Sci.* 2012.
- FECHINE, P. B. A. Avanços no desenvolvimento de nanomateriais. E-book. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. (Estudos da Pós-Graduação). Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/55633>. Acesso em: 04/06/2024

FURTINI, Ana Carolina Corrêa et al. Compósitos laminados de gesso com reforço de polpa celulósica e manta de juta. *Conjecturas*, v. 22, n. 9, p. 257-270, 2022.

GUPTA, Guddu Kumar et al. Pulp and paper industry–based pollutants, their health hazards and environmental risks. *Current opinion in environmental science & health*, v. 12, p. 48-56, 2019.

JEEVANANDAM, J. et al. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, v. 9, p. 1050-1074, 2018.

JOSSET, S., Orsolini, P., Siqueira, G., Tejado, A., Tingaut, P., Zimmermann, T., 2014. Energy consumption of the nanofibrillation of bleached pulp, wheat straw and recycled newspaper through a grinding process. *Nord. Pulp Pap. Res. J.* 29 (1), 167–175.

KUMAR, Varun; PATHAK, Puneet; BHARDWAJ, Nishi Kant. Waste paper: An underutilized but promising source for nanocellulose mining. *Waste management*, v. 102, p. 281-303, 2020.

LI, J. CAO, Q. REN et al. Effect of nano-silica and silicone oil paraffin emulsion composite waterproofing agent on the water resistance of flue gas desulfurization gypsum, *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 287,123-155, 2021.

LI, J. CAO, Q. REN et al. Effect of nano-silica and silicone oil paraffin emulsion composite waterproofing agent on the water resistance of flue gas desulfurization gypsum, *Construction and Building Materials*, [S.l.], v. 287,123-155, 2021.

LIU, Chao, Du, Haishun, Dong, Lv, Wang, Xin, Zhang, Yuedong, Yu, Guang, Li, Bin, Mu, Xindong, Peng, Hui, Liu, Huizhou, 2017. Properties of nanocelluloses and their application as rheology modifier in paper coating. *Ind. Eng. Chem. Res.* 56 (29), 8264–8273

MARINUCCI, G. *Materiais Compósitos Poliméricos: Fundamentos e Tecnologia*. São Paulo: Artliber Editora. 2011.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. *Compósitos estruturais: ciência e tecnologia*. Editora Blucher, 2016.

PISARENKO, Z.H.V.; IVANOV, L.A; WANG, Q. Nanotechnology in Construction: State of the Art and Future Trends. *Nanotechnologies in Construction*, [S.l.], v. 12, n. 4, p. 223–231, 2020.

SILVA, L., “Material compósito à base de gesso reforçado com fibras: caracterização mecânica,”*Engenharia Civil*, n. 49, pp. 5-14, 2014.

SOUSA, Jansen Antunes Correa de et al. *Desenvolvimento de um compósito com propriedade corta-fogo à base de gesso e cinzas de carvão mineral*. 2020.

SUOPAJÄRVI, T., Sirviö, J.A., Liimatainen, H., 2017. Nanofibrillation of deep eutectic solvent-treated paper and board cellulose pulps. *Carbohydr. Polym.* 169, 167 175.

THOSTENSON, E. T.; LI, C.; CHOU, TW. Nanocomposites in context. *Composites Science and Technology*, v. 65, n. 3, p. 491-516, 2005.

TOKAREV, Yurii et al. Modification of gypsum binders by using carbon nanotubes and mineral additives. *Procedia Engineering*, v. 172, p. 1161-1168, 2017.

VELOSO, M. C. R. DE A. et al. Produção e caracterização de compósitos à base de gesso reforçado com partículas de resíduo da agroindústria do cacau. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, 2021.

VELOSO, M. C. R. DE A. et al. Produção e caracterização de compósitos à base de gesso reforçado com partículas de resíduo da agroindústria do cacau. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, 2021.

VILLELA, Luciana Silva. Potencial de produção de compósitos à base de gesso reforçados com nanoestruturas / Luciana Silva Villela. - 2022. 89 p. : il.

ZHANG, L., Tsuzuki, T., Wang, X., 2015a. Preparation of cellulose nanofiber from softwood pulp by ball milling. *Cellulose* 22 (3), 1729–1741.

COMPÓSITOS DE GESSO REFORÇADOS COM RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS E MICRO/NANOCELULOSE KRAFT

Jhonatan Sales Satiro ^{a*}, Ianca Oliveira Borges ^a, Karini de Lourdes Silva Mesquita ^a, André Tetsuo Shashiki^a, Barbara Maria Ribeiro Guimarães de Oliveira ^a, José Benedito Guimarães Júnior ^a, Gustavo Henrique Denzin Tonoli ^a.

^a Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, Cx P.3037, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brazil.

*Corresponding author. Tel: +55 35 992289105, E-mail address: satiro.arqurb@gmail.com

RESUMO

Elementos construtivos de gesso são atrativos na construção civil por seu rápido endurecimento, resistência ao fogo e eficiência acústica e térmica. Contudo, devido à sua porosidade e baixa eficiência mecânica, o uso do gesso é geralmente limitado a interiores. Para melhorar essas propriedades, é necessária a adição de reforços, como fibras. As fibras para reforço podem ser obtidas de diversas fontes, inclusive de resíduos industriais, o que vai ao encontro do conceito de logística reversa. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito da adição de resíduo lignocelulósico industrial e micro/nanofibrila de celulose proveniente de tubo de papel kraft em compósitos a base de gesso. O delineamento consistiu na incorporação de reforço do material lignocelulósico tanto in natura quanto em nanoescala nas proporções de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% do material in natura e nas proporções de 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% e % do material em nanoescala para substituição do gesso. Os corpos de prova foram avaliados quanto às propriedades de absorção de água, massa específica aparente, ensaio mecânico à flexão e propriedades térmicas. Houve um incremento de 10% no aumento de absorção de água em compósitos com resíduos e 87% de aumento em nanocompósitos e massa específica aparente com o aumento dos reforços na matriz. Os compósitos com a incorporação se mostraram positivos para a condutividade térmica. Quanto à resistência à flexão houve decréscimo com a incorporação dos reforços, mas ainda aceito pela normativa. A caracterização do gel de micro/nanocelulose obtido do resíduo de tubo avaliou estabilidade, reologia e distribuição de diâmetro. A reutilização desse resíduo de tubo de papel kraft em compósitos de gesso mostrou ser uma alternativa viável para sua incorporação na matriz, além da logística reversa em reutilizar um material que seria descartada no meio ambiente de maneira inadequada, proporcionando diversos impactos negativos, demonstrando novas possibilidades de uso do material

Palavras-chave: Propriedades físicas e mecânicas; Condutividade térmica; Micro/nanocelulose; Construção civil; Nanotecnologia.

ABSTRACT

Constructive gypsum elements are attractive in civil construction due to their rapid hardening, fire resistance, and acoustic and thermal efficiency. However, due to its porosity and low mechanical efficiency, gypsum use is generally limited to interiors. To improve these properties, reinforcement, such as fibers, is necessary. Reinforcing fibers can be obtained from various sources, including industrial waste, which aligns with the concept of reverse logistics. In this context, the general aim of this study was to evaluate the effect of adding industrial lignocellulosic waste and micro/nanocellulose fibrils derived from kraft paper tubes in gypsum-based composites. The design included incorporating the lignocellulosic material reinforcement in both raw and nanoscale forms at proportions of 0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10% of the raw material and proportions of 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, and 1% of the nanoscale material as a gypsum substitute. The specimens were evaluated for water absorption, apparent density, flexural mechanical strength, and thermal properties. A 10% increase in water absorption was observed in composites with residues and an 87% increase in nanocomposites, along with an increase in apparent density with higher reinforcement in the matrix. The composites with this incorporation were favorable for thermal conductivity. Flexural strength showed a decrease with reinforcement incorporation but remained within acceptable standards. The characterization of the micro/nanocellulose gel obtained from the tube waste assessed stability, rheology, and diameter distribution. The reuse of this kraft paper tube waste in gypsum composites proved to be a viable alternative for incorporation into the matrix, contributing to reverse logistics by reusing a material that would otherwise be improperly discarded in the environment, causing various negative impacts and demonstrating new potential applications for the material.

Keywords: Physical and mechanical properties; Thermal conductivity; Micro/nanocellulose; Civil construction; Nanotechnology.

1. Introdução

O gesso, material obtido a partir da gipsita, possui uma história que remonta a aproximadamente 8.000 a.c., sendo um dos materiais mais antigos utilizados na construção

civil. Com uma versatilidade impressionante, o gesso é amplamente utilizado no setor, representando 95% da produção. Além disso, pode ser reforçado com diferentes materiais, possui baixo custo de fabricação e é facilmente disponível (Salino et al., 2021).

Os elementos construtivos com matriz de gesso possuem diversas características atrativas na construção civil, como endurecimento rápido, resistência ao fogo, alta qualidade de acabamento superficial, ausência de retração por secagem, eficiência acústica e térmica (Oliveira et al., 2020). No entanto, devido à sua natureza porosa, alta permeabilidade e baixa eficiência mecânica, o uso do gesso é geralmente restrito em aplicações no interior das edificações. Pensando nisso, a adição de reforços, como fibras, é necessária para aprimorar essas propriedades (Brandão, Carvalho, 2019).

O uso de reforços, como resíduos sólidos, fibras sintéticas, fibras lignocelulósicas e partículas são necessários para utilização do gesso como matéria-prima na produção de compósitos (Oliveira et al., 2020). Diversas pesquisas exploram o uso de diferentes reforços na matriz de gesso, como resíduos de algodão (Lopes et al., 2022), sisal (Brandão, Carvalho, 2019), fibras Kraft (Alves, 2023), manta de juta e polpa celulósica (Furtini et al., 2022), entre outros. A incorporação de reforços lignocelulósicos contribui para a inovação e o desenvolvimento de novos materiais, com propriedades mecânicas, físicas, acústicas e térmicas otimizadas, além de promover a sustentabilidade (Villela et al., 2020).

Os tubos de papelão, provenientes do processo de reciclagem do papel kraft, são empregados na construção civil como moldes para formação de colunas e pilares de sustentação. Produzidos a partir de papel reciclado, os tubos são revestidos com acetato de polivinila (PVA) e silicato de sódio para melhorar seu desempenho mecânico (Dias, Salado, 2020; Dias, Salado, 2021). No entanto, após o uso único, os tubos de papel reciclados são descartados, o que abre oportunidades para aplicação desse material in natura e em nanoescala como reforço na matriz de gesso.

A incorporação de diversos tipos de materiais e tecnologias como reforço não apenas promove a sustentabilidade, mas também desempenha um papel essencial na criação de novos materiais com propriedades aprimoradas. Um exemplo notável dessa inovação é o uso de nanofibrilas de celulose, que tem se destacado na área de compósitos devido à sua ampla disponibilidade e excelente biocompatibilidade, tornando-se uma opção promissora para o desenvolvimento de materiais avançados e sustentáveis (SALINO et al. 2021; VENKATESAN et al. 2023)

Diante disso, o objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito da substituição do gesso por tubos reciclados de papéis kraft, tanto *in natura* como em escala nanométrica na melhoria do desempenho físico, mecânico, térmico, acústico e microestrutural dos compósitos.

2. Materiais e métodos

2.1 Matéria-prima

Para a produção dos compósitos foi utilizado como matriz gesso fino comercial para fundição, massa específica de 781 Kg/m³ e módulo de finura de 0,85 com tempo de pega de 9 e 22 minutos. Para reforço utilizou se de resíduo de tubo de papel kraft (Figura (1 A)) disponibilizada por uma indústria de embalagens. O material foi triturado por um moinho de facas (Figura (1 B)) para ser utilizado no compósito sob a forma *in natura* e para obtenção da suspensão de micro/nanofibrilas de celulose – MFC/NFC (Figura (1 C)) para posterior incorporação na produção dos nanocompósitos de gesso.

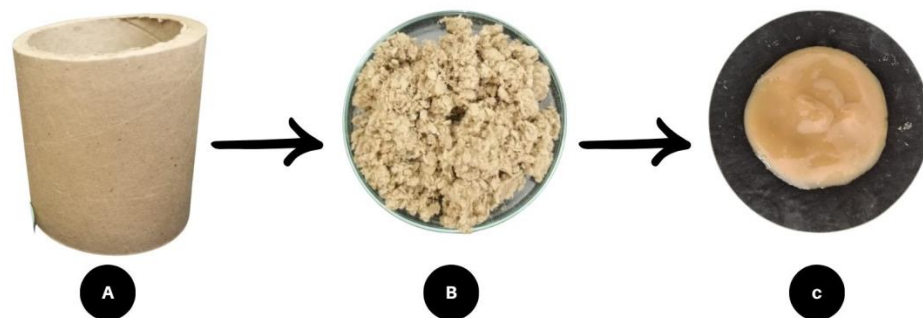


Figura 1. Matéria prima utilizada para a obtenção dos compósitos de gesso. (A) Tubo de papel Kraft; (B) Tubo de papel Kraft moído – *in natura*; (C) Micro/Nanofibrila de ccelulose do tubo de papel Kraft. (MFC/NFC)

2.2 Caracterização química estrutural

O tubo de papel Kraft foi caracterizado quanto às suas propriedades químicas e físicas, conforme as análises e normas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Análises e normas para caracterização química e física do papel reciclado

Análises	Normas
Extrativos totais	NBR 14853 (ABNT, 2010)

Lignina insolúvel	NBR 7989 (ABNT, 2010)
Celulose	Kennedy, Phillips e Willians (1987)
Holocelulose	Browning (1963)
Cinzas	NBR 13999 (ABNT, 2017)
Densidade básica	NBR 11941 (ABNT, 2003)

O teor de hemicelulose foi quantificado pela diferença entre os teores de holocelulose e celulose. Todas as análises foram feitas em triplicata para desvio padrão, valores médios e coeficiente de variação.

2.3 Produção da micro/nanofibrila de celulose – MFC/NFC

O resíduo de tubo de papel Kraft foi inicialmente triturado em moinho de facas e posteriormente colocado em água deionizada na proporção de 2,5% (m/m), por um período de 24h para hidratação e entumescimento das fibras. Após essa etapa, o material foi submetido ao desfibrilamento mecânico utilizando o moedor de fibrilação Supermasscolloider (Masuko Sangyo MKCA6-2), equipado com dois discos de pedra (MKCA6-80) a 1500 rpm, passando pelo mecanismo 15 vezes até a obtenção do gel de MFC/NFC, seguindo o método descrito por Mendonça et al. (2022). O esquema utilizado na produção das nanofibrilas de celulose pode ser visualizado na Figura 2.

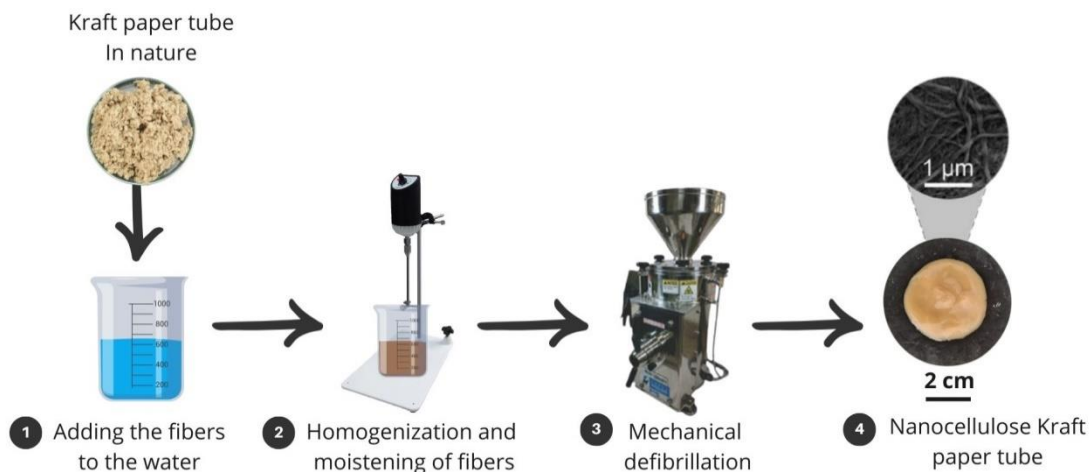


Figura 2. Obtenção da NFC

2.4 Caracterização da Micro/nanofibrila de Celulose

2.4.1 Estabilidade das suspensões

A estabilidade da suspensão foi conduzida de acordo com a metodologia descrita por Guimarães Júnior et al. (2015). Foi preparada uma solução de 50 mL contendo 0,1 g de NFC em massa seca, a fim de tornar as soluções mais estáveis. As suspensões foram homogeneizadas

em agitador magnético a 450 rpm por 15 min. Em seguida, foram retiradas duas alíquotas com 8 mL da solução para análise. Foram obtidas imagens das soluções a cada 1 hora, durante um período total de 8 horas. Foi utilizado o software ImageJ (RUEDEN et al., 2017) para medir a diferença da altura total da solução e a altura da NFC suspensa em cada amostra. A estabilidade da suspensão foi medida de acordo com a Equação 1.

$$\text{Estabilidade (\%)} = (S/T) \times 100$$

S corresponde ao ponto elevado da NFC suspensa no Tubo.

T corresponde ao ponto elevado da solução total presente no tubo.

2.4.2 *Reologia*

As propriedades viscoelásticas do gel de nanocelulose utilizados neste experimento foram avaliadas em um reomêtro Anton Paar modelo MCR 102e, equipado com geometria de placas paralelas (50mm de diâmetro e 1mm de gap). A curva de viscosidade foi medida com taxa de cisalhamento de 0.01 a $100s^{-1}$. A varredura de deformação oscilatória foi realizada de 0,01 a 100% a 1Hz. Os testes de varredura de frequência foram realizados na faixa de 0.01 a 100 rads/s com deformação de cisalhamento constante de 0.1%. Todos os testes foram realizados em temperatura controlada de 25°C.

2.4.3 *Análise de demanda iônica*

A solução de MFC/NFC foi analisada em um sistema de análise de cargas CAS-II touch! (Emtec Electronic GmbH, Lípsia, Alemanha). Para o ensaio foi preparada a suspensão da solução de 0,01% (massa seca/volume). Foi medido o potencial inicial (mV) e a demanda iônica (catiônica ou aniônica) ($\mu\text{eq L}^{-1}$) do material, baseando-se em um sistema de titulação. A análise foi realizada em triplicata.

2.4.4 *Microestrutural - Microscópio Eletrônico de Varredura*

Para a análise microestrutural da nanocelulose produzidas a partir de tubos de papel Kraft, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV). O material foi feito uma suspensão de 0,01% e depositada uma gota em stubs e mantido em ambiente controlado para evitar o contato da amostra com a umidade, posteriormente foram colocados em porta amostras de alumínio com fita de carbono e metalizado com ouro por 6 segundos, sem gás de arraste,

antes de ser analisado no Microscópio Eletrônico de Varredura STEM - FEG, modelo CLARA – TESCAN (Oberkochen, Alemanha).

2.5 Produção dos compósitos e nanocompósitos

Os compósitos foram produzidos variando o percentual de reforço incorporado em massa, sendo usado o papel Kraft reciclado *in natura* (IN) e a nanocelulose (NC) produzida a partir do mesmo material. Foram testadas cinco concentrações diferentes, como apresentado na Tabela 2. Para o estudo foram produzidos três corpos de prova para cada tratamento.

Tabela 2. Delineamento experimental

Treatment	Plaster (%)	Recycled Paper(%) - Dry pasta	
		<i>In natura</i>	
IN 0%	100.0	0.0	
IN 2.5%	97.5	2.5	
IN 5%	95.0	5.0	
IN 7.5%	92.5	7.5	
IN 10%	90.0	10.0	
Micro/Nanocelulose			
NC 0%	100.00	00.0	
NC 0.25%	99.75	0.25	
NC 0.5%	99.50	0.50	
NC 0.75%	99.25	0.75	
NC 1%	98.00	1.00	

Os resíduos *in natura* foram inicialmente colocados em um béquer e adicionados gesso e água. O mesmo procedimento foi seguido para a micro/nanocelulose, substituindo parte da água na produção, com um teor de sólidos de 1,5%. Em seguida, o material foi agitado manualmente para homogeneização da mistura. Os corpos de prova foram colocados em moldes de madeira com dimensões internas de 40 x 40 x 160 mm, de acordo com as especificações da EM 13279-2 (2006). Após um período de 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em local seco, ventilado e protegido de intempéries. Os testes foram realizados após 7 dias, para assegurar a estabilização dos compósitos.

2.6 Caracterização dos compósitos

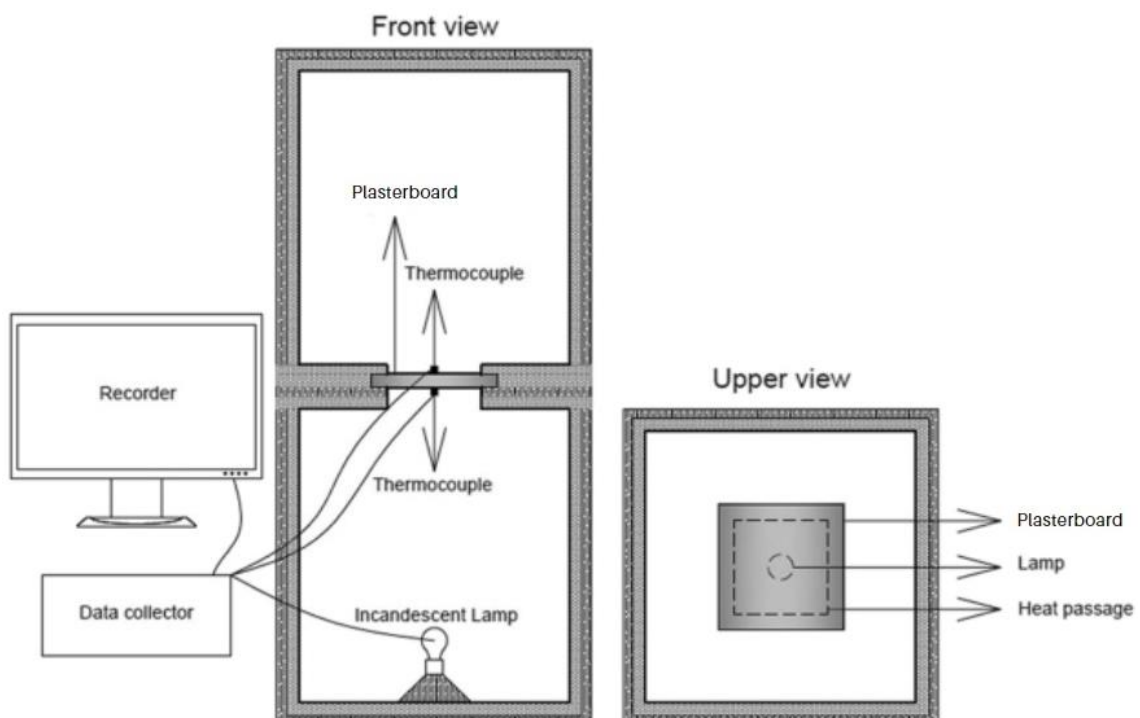
2.6.1 Análises físicas e mecânicas

A massa específica foi determinada de acordo com a norma NM 23 (2000) e a absorção de água por imersão após 2 horas, seguindo a EN 520 (2004). Os ensaios mecânicos de flexão e compressão foram conduzidos em máquina de teste universal, conforme Balti et al. (2023). Para o ensaio de flexão em 3 pontos, foram utilizados corpos de prova nas dimensões 40×40×160 mm com distância de 100mm entre os suportes da máquina.

2.6.2 Isolamento térmico

A análise de isolamento térmico dos compósitos de gesso seguiu o método descrito por Mendes et al. (2021). O equipamento utilizado é composto por um simulador térmico o qual mantém a temperatura em torno de 60°C. Durante a análise, as temperaturas são registradas por meio de sensores. As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 1 °C/min durante o ciclo de 1 hora. Os dados foram coletados e manipulados pelo dispositivo de coleta de dados, modelo IM DC 100-01E (Figura 2). Os resultados obtidos referentes à condutividade térmica foram analisados seguindo as diretrizes da NBR 15220 (ABNT, 2005). As dimensões dos corpos de prova foram de 40×40×40 mm.

Figura 2. Diagrama para obtenção dos resultados térmicos dos compósitos de gesso



Fonte: Adaptado de Mendes et al. (2021)

2.6.3 Microestrutural

Os compósitos de gesso fraturados foram examinados utilizando um microscópio óptico Leica DM4000B (LM) acoplado a uma câmera digital Moticam X - Motic Europe CMOS com ampliação de 100x. Foi avaliada a região fraturada a fim de analisar a interação do material com a matriz e a presença de porosidade.

2.7 Análise estatística

Os tratamentos foram analisados utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado. Para avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 0.05%. As análises foram realizadas por meio do software estatístico SISVAR.

3. Resultados e discussões

3.1 Caracterização química estrutural

A análise química do papel reciclado, com e sem presença de adesivo de silicato, é mostrada na tabela 3.

Tabela 3 Valores médios para os componentes da análise química estrutural e respectivos testes de médias para os resíduos de papel com e sem presença do adesivo de silicato

Análises	Papel com silicato	Papel sem silicato (Puro)
Extrativos totais (%)	6.80 ^(0.76)	2.73 ^(0.23)
Lignina Insolúvel (%)	21.20 ^(1.39)	20.21 ^(2.79)
Celulose (%)	34.5 ^(23.34)	74.50 ^(1.43)
Holocelulose (%)	85.15 ^(0.15)	80.04 ^(3.92)
Cinzas (%)	12.83 ^(0.38)	6.54 ^(0.14)

Desvio padrão entre parênteses.

Em relação às propriedades químicas dos resíduos de papel, é notável a diferença nos valores das amostras com e sem presença de silicato, indicando que o adesivo não foi

completamente removido durante o processo. Ao comparar o teor de extrativo total dos resíduos de papel com e sem silicato com outros resíduos presentes na literatura, observa-se que o material utilizado nesta pesquisa apresenta valores inferiores.

Borges et al. (2022) encontraram ~14% de extrativos para resíduos de soja e Veloso et al. (2021) obtiveram concentração de ~35% para resíduos de cacau. Porém, quando comparado com o eucalipto (~6,67%) estudado por Oliveira et al. (2020), observam-se valores próximos aos encontrados para papéis com presença de silicato. Segundo Oliveira et al. (2020), um alto teor de extrativos em materiais lignocelulósicos pode afetar a interação da matriz com o reforço.

O teor de lignina do papel com e sem silicato foi semelhante ao de outros resíduos como o de soja (~22%) encontrado por Borges et al. (2022), casca de arroz (~20%) e tronco de palmeira (~19%) estudados por Mesquita Junior et al. (2018). As concentrações também foram semelhantes às das fibras de madeira de eucalipto (~21%) estudadas por Oliveira et al. (2020).

De acordo com Bhatia et al. (2012), a lignina proporciona impermeabilidade, rigidez e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais. Assim, com o aumento do teor de lignina, o material poderá apresentar melhores propriedades, como maior rigidez, maior resistência à compressão e menor absorção de água. Porém, segundo Weber et al. (2017), teores elevados desses constituintes em compósitos podem retardar o endurecimento do gesso e gerar incompatibilidade entre matriz e reforço, afetando as propriedades mecânicas.

O teor de holocelulose (celulose e hemiceluloses) em papéis com e sem silicato foi semelhante. Porém, a concentração de holocelulose foi superior à relatada na literatura para resíduo de feijão (~57%) estudado por Miranda et al. (2022), resíduo de trigo (~60%) encontrado por Gomes et al. (2022) e resíduo de milho (~77%) pesquisado por Scatolino et al. (2013). No estudo de Oliveira et al. (2020), encontraram 70% de holocelulose nas fibras de eucalipto.

Os materiais lignocelulósicos são altamente hidrofílicos devido aos grupos hidroxila (OH) presentes na holocelulose, o que pode dificultar o uso desses materiais em diversas aplicações, devido ao seu impacto negativo na absorção de água e nas propriedades de umidade (Guimarães Júnior et al., 2016). Porém, um dos componentes da holocelulose é a celulose, que confere boas propriedades mecânicas ao material em que é

aplicada. Portanto, baixos teores deste componente podem indicar perda nas propriedades mecânicas dos compósitos (Iwakiri; Trianoski, 2020).

O teor de cinzas do papel com presença de silicato foi de ~13%, o dobro do papel puro. Isto indica que o adesivo ainda está presente no material mesmo após ser carbonizado a 525°C. Além disso, as concentrações de cinzas neste estudo foram maiores em comparação ao bagaço de cana (~1%) estudado por Protásio et al. (2013) e resíduo de cacau (~4%) estudado por Veloso et al. (2021). Segundo Mesquita Júnior et al. (2018), as cinzas podem auxiliar no retardamento de chama em compósitos de gesso, sendo inertes a outras propriedades.

3.2 Análises da Micro/Nanocelulose

3.2.1 Estabilidade das suspensões

A estabilidade das suspensões de micro/nanofibrila de cellulose de resíduo de tubo de papel kraft está apresentada na Figura 3.

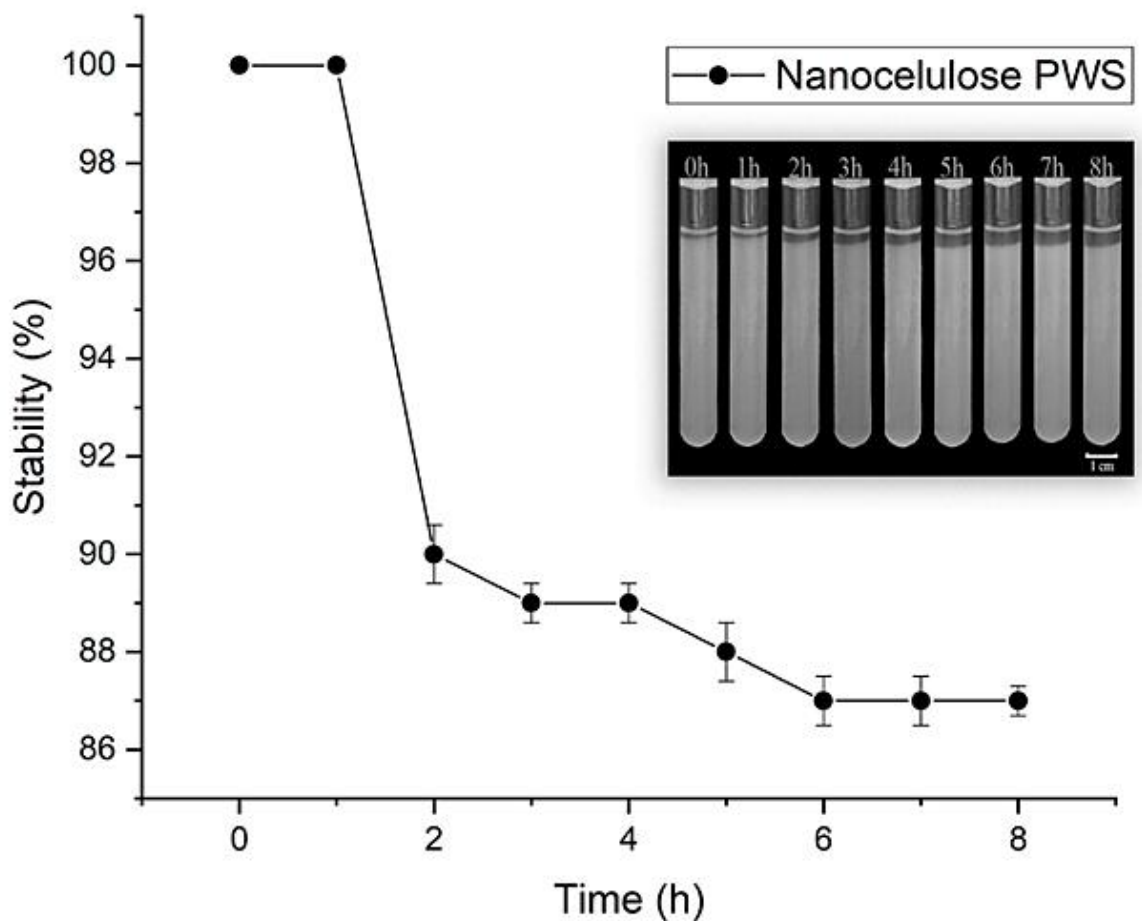


Figura 3. Estabilidade das suspensões de MFC/NFC

As imagens de sedimentação da suspensão da NFC no tempo $t=0$ e $t=1$ mostra que a amostra de Micro Nanofibrila de celulose encontra-se dispersa em meio líquido. No entanto, a partir do tempo $t=2$ ocorre um declínio da estabilidade, que apresenta valores de 90~85%, mantendo-se estável até o final do tempo de ensaio ($t=8$). Esse comportamento pode ser atribuído à presença do adesivo de silicato de sódio (Na_2SiO_3), utilizado no processo de fabricação dos tubos de papel (Figura 4. (A)). Comportamento semelhante foi encontrado por Shashiki et al. (2023) em um estudo da estabilidade das suspensões de nanofibrila de celulose de torta de mamona, onde a adição de sal resultou em aumento de cerca de 10,6 % na estabilidade. Esse processo ocorre, segundo Yang et al. (2021), pela formação de camada elétrica de cátions (Na^+) gerando uma membrana na superfície das MFC/NFC, a qual fica responsável pelo impedimento da aglomeração do material entre si. De acordo com Mascarenhas et al (2022) as suspensões tendem a ter baixas sedimentações em MFC/NFC com tratamentos de silicato de sódio, corroborando a alta estabilidade nas amostras em suspensão.

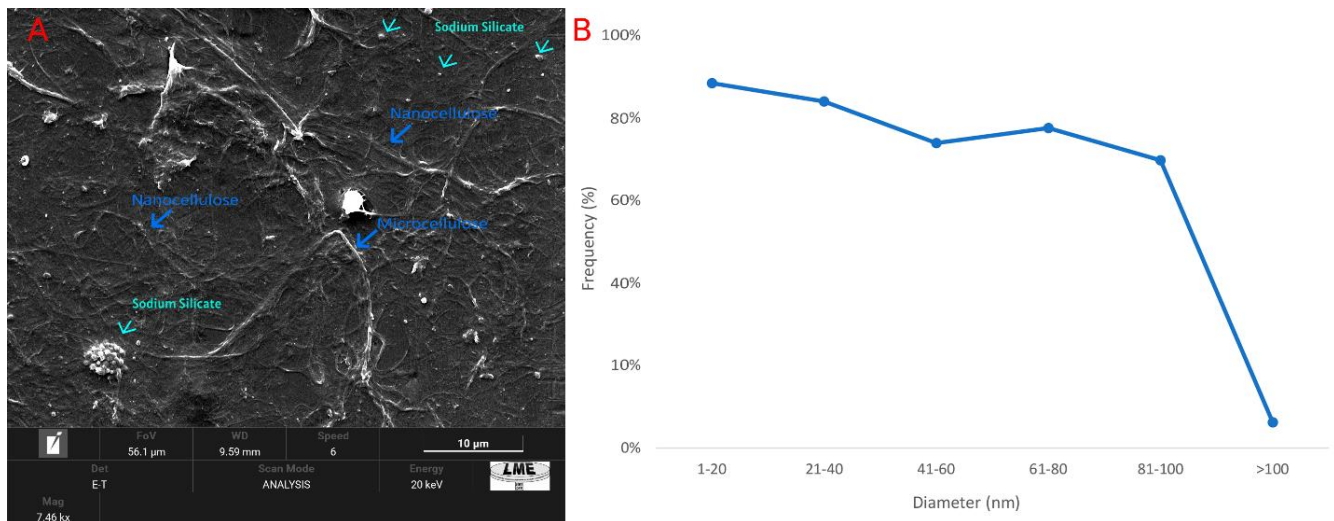


Figura 4. (A) Microscopia Eletrônica de Varredura (B) Gráfico de distribuição Micro/Nanocelulose.

A presença do Silicato de sódio, além de melhorar a estabilidade das MFC/NFC, atua também como um auxiliador durante o processo de desfibrilação do material ao ponto de consistência final do gel, sendo necessários mais estudos para ampliar e analisar o consumo de energia.

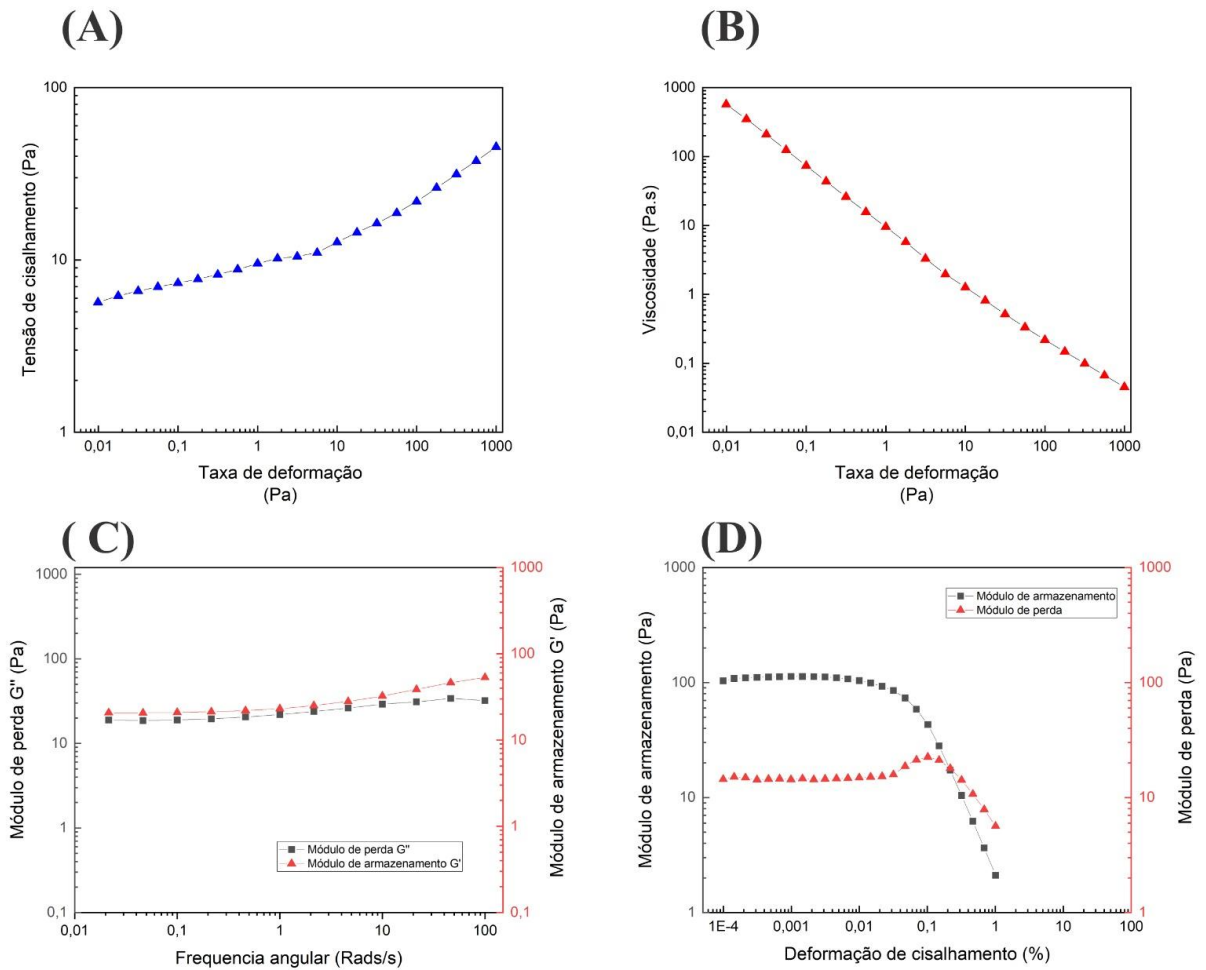
A Figura 4. (B) refere-se ao gráfico de distribuição de diâmetro da MFC/NFC. Seus resultados apontam que o gel apresenta uma distribuição homogênea, alcançando nanoestruturas presentes nas faixas de frequência (100 – 60%) com diâmetros menores que 100nm, que são necessários para considerar como material nanométrico (SALEEM et al., 2021). Segundo Mascarenhas et al. (2022) a alcalinidade presente no silicato de sódio (Na_2SiO_3)

contribui na eficiência da fibrilação das polpas, resultando em uma individualização do material e nas estruturas atingindo a nanoescala.

3.2.2 Reologia

Os resultados obtidos nos testes viscoelásticos estão apresentados na figura 5.

Figura 5. Resultados relativos às as propriedades reológicas. (a) curva de fluxo. (b) curva



de viscosidade aparente. (c) Varredura de frequência. (d) e (e) Varredura de amplitude.

A curva de fluxo na figura 5(a) mostra os valores de tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento utilizados para se calcular a viscosidade aparente. Ao se comparar o comportamento dessas duas grandezas com outros géis a base de celulose (Vadodaria et al., 2018);(Zakani e Grecov, 2020) é possível observar que géis obtidos do resíduos em mesmas faixas de taxa de cisalhamento apresentaram uma menor variação na tensão de cisalhamento (5 a 45 Pa) quando comparados a géis obtidos por oxidação com TEMPO (10 à 100 Pa). A curva de viscosidade aparente figura 5(b) mostra

um claro comportamento de desgaste por cisalhamento para os géis deste estudo, onde a baixas taxas de cisalhamento os géis apresentaram alta viscosidade e, conforme a taxa de cisalhamento aumenta é possível observar um declive nos valores de viscosidade relativa mostrando um claro comportamento de fluido pseudoplástico. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato que taxas de cisalhamento maiores induzem a destruição das redes formadas pelas fibras de celulose no gel (Almeida et al., 2021). A figura 5 (c) mostra os valores obtidos para o teste de varredura de frequência. Este teste é vastamente utilizado para se obter informações sobre a estabilidade da rede 3D em géis e sistemas coloidais (Zhang et al., 2015). O gel de NFC deste trabalho apresentou um claro platô entre o módulo de armazenamento G' e o módulo de perda G'' onde em nenhuma faixa de frequência G'' foi maior que G' indicando que o material possui um comportamento gel/sólido (Wu et al., 2021). A figura 5 (d) mostra os resultados do teste de varredura de amplitude. Neste tipo de teste o módulo de armazenamento G' se relaciona com o comportamento de sólido enquanto o módulo de perda G'' está relacionado com o comportamento de líquido dos géis (Mendoza et al., 2018), para o gel deste estudo foi possível observar que em baixas tensões de cisalhamento possui uma região viscoelástica linear (LVR) em que os módulos elásticos G' e G'' são independentes da tensão aplicada e dentro desta região $G' > G''$ o que indica que o material está agindo como um sólido e tende a apresentar estrutura elástica e altamente estruturada. Porém com o aumento da tensão aplicada G'' começa a aumentar e G' a diminuir indicando que a rede formada pelas fibras de celulose começou a ceder até se atingir o valor crítico de 0,27% onde G'' começa a ser maior que G' indicando que o material começou a se comportar como um líquido.

3.3 Análises dos compósitos e nanocompósitos

3.3.1 Massa específica e absorção de água

A massa específica aparente realizada em compósitos com a incorporação de resíduos *in natura* (Figura 6.(A)) foi de $0,23 \pm 0,30$ (Kg/m^3). Alterações significativas da substituição de gesso pelo resíduo de tubo de papel kraft não foram observadas. Esse resultado se obtém devido ao material apresentar uma natureza higroscópica (VILLELA et al., 2020). Para os compósito com a adição de micro/nanocelulose o valor observado foi de $0,24 \pm 0,28$ (kg/m^3) (Figura 6. (B)). A relação da quantidade de água para a produção dos compósitos tem influência direta nas resistências físicas na matriz de gesso que depende da ligação dos cristais di-hidratados e da porosidade final (PERES et a., 2001).

A existência da porosidade nas microestruturas da matriz de gesso se relaciona de maneira geral com a presença da água; quanto maior a quantidade de água maior será o números de poros (vazios) após o endurecimento. Como consequências têm-se a diminuição das propriedades mecânicas, como a resistência a flexão; entretanto, há aumento na resistência a passagem de calor, auxiliando na condutividade térmica.

Villela et al. (2020) incorporaram na substituição de gesso embalagens multicamadas de papel trituradas, encontrando valores de massa específica de $0,214 \pm 0,026 \text{ kg/m}^3$. O delineamento foi (0%, 7,5%, 15%, 22,5% e 30%). A relação foi de 0,75% para as substituições de 15% e 0,80% para demais incorporação (22,5 e 30%)

Serna et al. (2012) incorporaram na matriz de gesso diferentes proporções de partículas de borracha de pneu, tendo analisado também variadas proporções de água e gesso (0,6; 0,7 e 0,8). Os resultados mostraram que a adição das partículas de borracha resultou em uma redução nas propriedades mecânicas dos compósitos, contudo, as variações na relação água/gesso tiveram um impacto mais significativo nas propriedades mecânicas do que a incorporação das partículas de borracha.

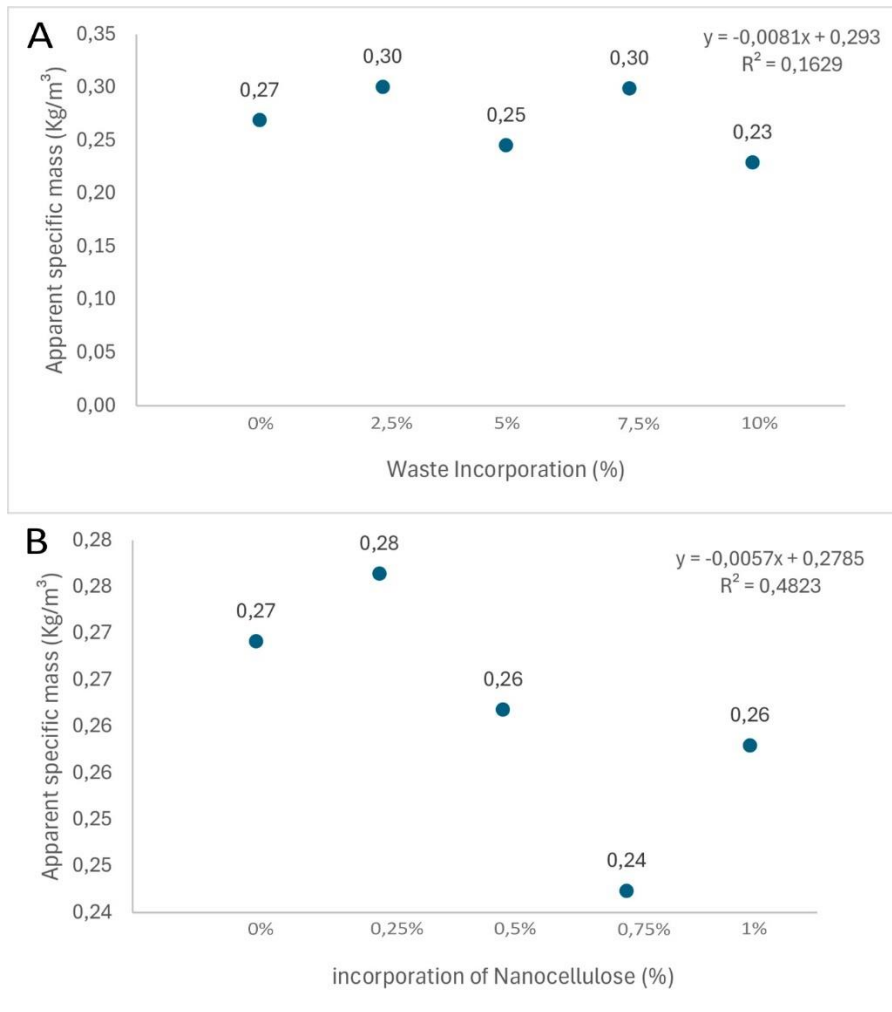


Figura 6. (A) Massa Específica Aparente com incorporação de resíduo. (B) Massa Específica Aparente com incorporação de Micro/Nanofibrila de celulose.

Para a absorção de água, observou-se aumento significativo dos valores para os compósitos que tiveram a incorporação de resíduos de tubo de papel kraft, a partir da concentração de 7,5% (Figura 7. (C)). Pode-se sugerir que o aumento de porcentagem de material lignocelulósico ocasionou em um aumento na absorção de água; isso se deve à natureza higroscópica do material, absorvendo maior quantidade de líquidos tanto da matriz quanto da análise. A Figura 7 (D) referente aos compósitos com a incorporação da MFC/NFC, apresenta altos índices de absorção de água, esse motivo se dá pelo fato do gel possuir alto volume de líquidos em relação ao seu teor de sólidos de 1,5%. Esse aumento de água na matriz torna o compósito mais poroso, absorvendo maior quantidade de água (VILLELA et al., 2020).

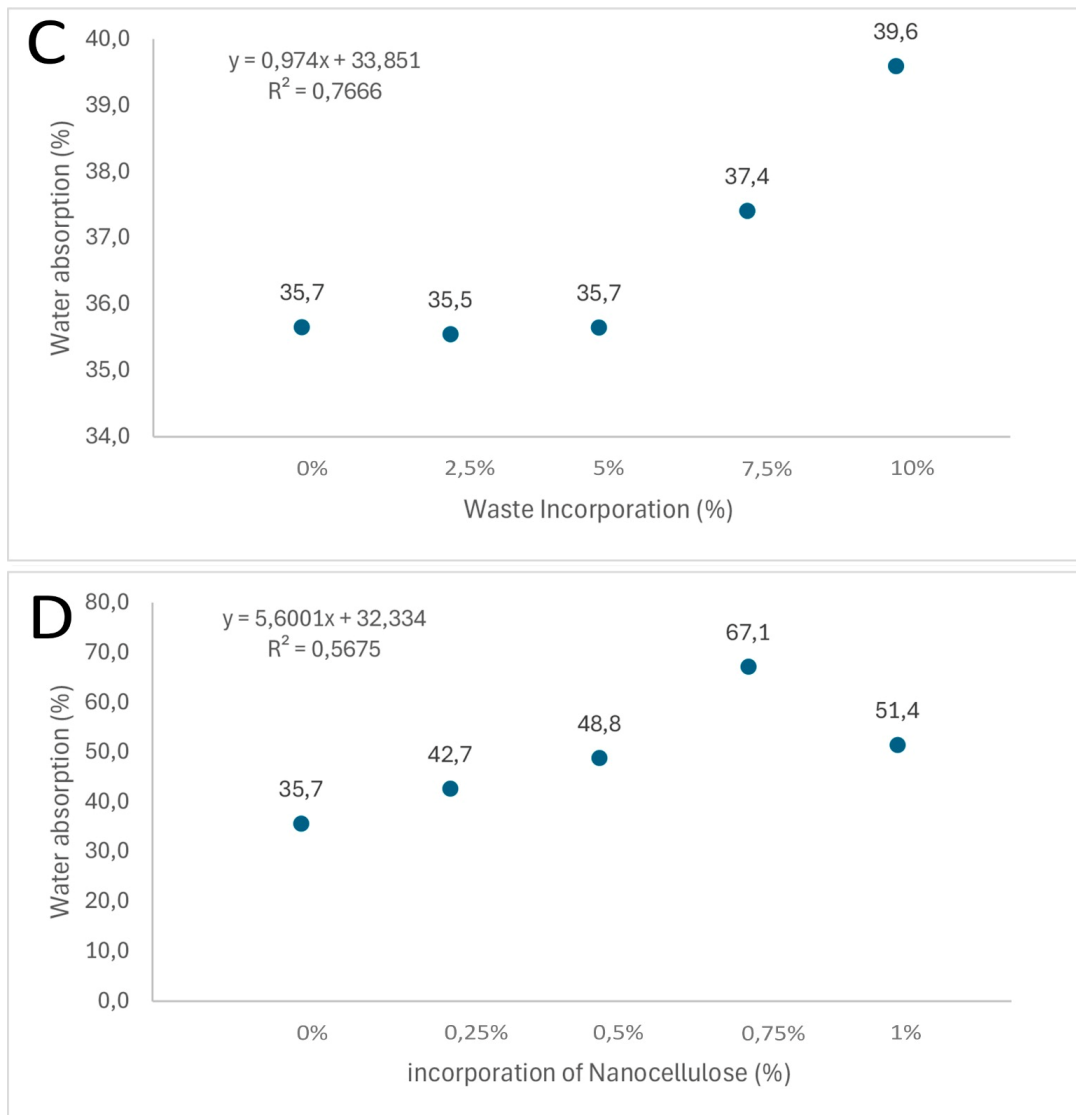


Figura 7. (C) absorção de água compósito com resíduo. (D) absorção de água em compósito com nanocelulose.

Haselein et al.(2002) produziram chapas aglomeradas de gesso, adicionando papel reciclado de jornal e partículas de madeira como reforços. Ao analisarem a absorção de água, identificaram um valor médio de ~30% para as amostras referência. Já Villela et al. (2020) encontraram resultado médio de ~31,67% para compósitos incorporados de papel multicamadas como reforço para matriz de gesso, sendo semelhante ao valor encontrado nesse estudo para compósitos sem a adição de reforços de ~35,7%.

3.3.2 Propriedades mecânicas

Os resultados obtidos no ensaio de flexão estática, para a resistência de ruptura à flexão (MOR) mostraram que a adição de papel in natura nos compósitos resultou em um aumento gradativo nos tratamentos acima de 5%, enquanto houve uma diminuição significativa no tratamento de 2,5%, com redução de 0,14 Mpa em relação ao tratamento controle.

De acordo com a norma EN 13279-1 (2008), o valor recomendado para resistência de ruptura a flexão é de 1 MPa. Mesmo com a diminuição observada no tratamento de 2,5%, a inclusão do papel in natura atende às especificações exigidas pela norma, visto a tendência de crescimento da resistência à ruptura à flexão nos tratamentos acima de 5%.

Os compósitos com matriz de gesso e reforço de nanocelulose apresentaram uma diminuição na resistência de ruptura à flexão (MOR) (figura NC. Nanocompósitos) em todos os tratamentos em relação ao tratamento controle. O tratamento com adição de 0,5% de nanocelulose apontou o menor índice de resistência, com valor de 0,77 Mpa, abaixo do valor preconizado pela norma EN 13279-1 (2008), que é de 1 Mpa.

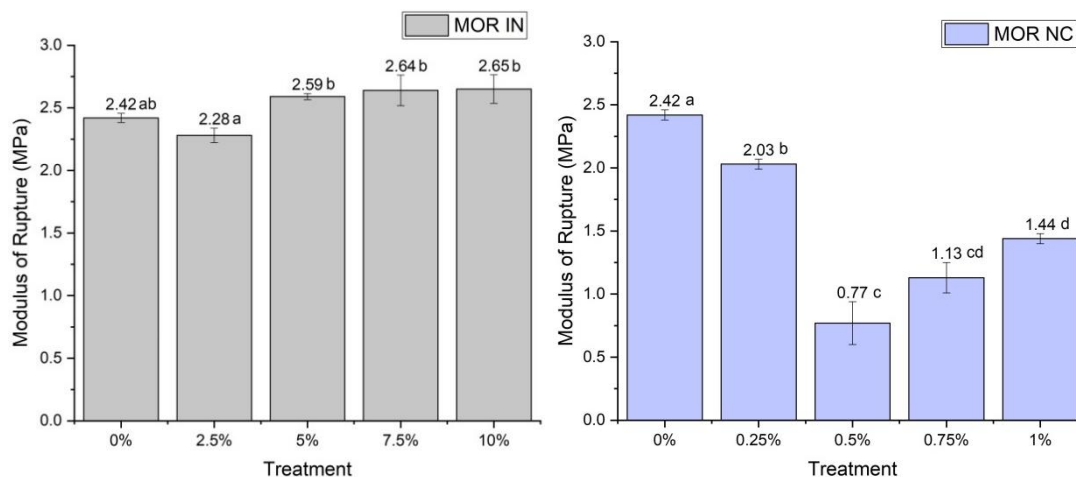


Figura 8 . Módulo de ruptura, sendo (IN) compósitos e (NC) nanocompósitos. Desvios seguido das mesmas letras não diferem estatisticamente.

Para o módulo de elasticidade (MOE), os tratamentos com resíduo in natura (IN. Compósitos) mostraram que a adição do resíduo diminuiu a rigidez do material em todos os tratamentos, sendo que o menor índice foi observado no tratamento de 10%, o qual apresentou uma diminuição de 102,46 Mpa. Os resultados indicam que o aumento da porcentagem de reforços resultou em uma diminuição significativa na resistência do compósito.

Acerca do módulo de elasticidade (MOE) nos tratamentos com nanocelulose de resíduo de tubo de papel kraft (NC. Nanocompósitos), observa-se que este se relaciona diretamente à resistência de ruptura à flexão dos compósitos, visto que os valores variaram proporcionalmente ao módulo de ruptura. Essas variações podem estar relacionadas a alterações na microestrutura dos compósitos, causadas pela adição de micro/nanocelulose, que podem favorecer a formação de microfissuras e poros. Além disso, a interação entre a matriz de gesso e a micro/nanocelulose também podem contribuir para diminuição do módulo de elasticidade. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores, que destacam fatores como microfissuras, formato e dimensão das partículas, porosidade do compósito e do material, conforme Veloso et al. (2021) e Trocinski et al. (2023).

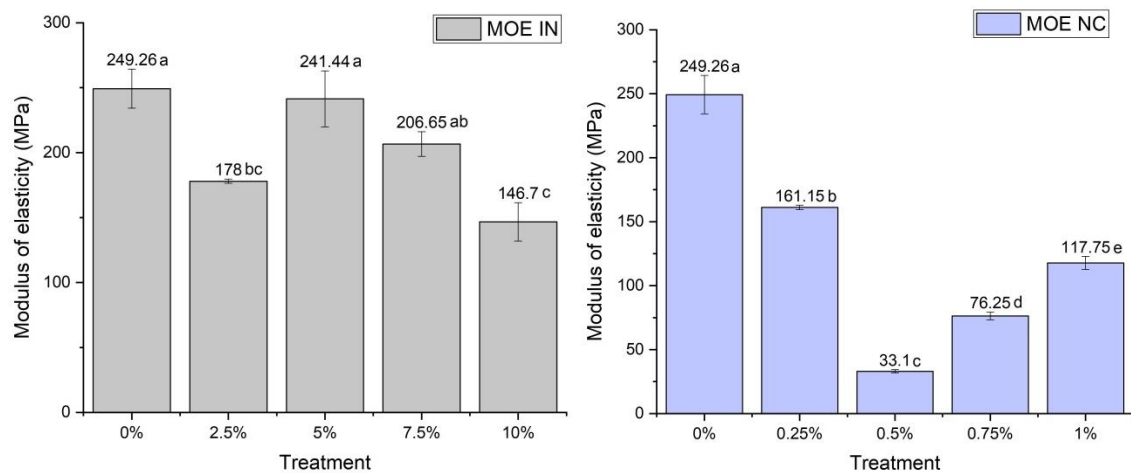


Figura 9 . Módulo de elasticidade, sendo (IN) compósitos e (NC) nanocompósitos. Desvios seguido das mesmas letras não diferem estatisticamente.

Devido à menor densidade do reforço em comparação à matriz, ocorre uma compactação reduzida na estrutura do compósito. Isso resulta na formação de uma matriz inadequada para envolver os reforços, criando estruturas de interconexão no compósito que

afetam a transferência de carga, tornando-a menos eficiente, conforme descrito por Dai e Fan (2015).

Assim, observa-se que as variáveis que contribuem para diminuição dos valores do módulo de elasticidade são as estruturas menos compactas e porosas do reforço, ocasionando uma interação fraca entre reforço e matriz e a formação de poros.

As figuras 10 (A) e 10 (B) apresentam os resultados de microscopia ótica realizadas em compósitos sem a incorporação de reforços e incorporados com resíduos de tubo de papel kraft, respectivamente, sendo amostras analisadas obtidas a partir do ensaio de flexão em sua fratura.

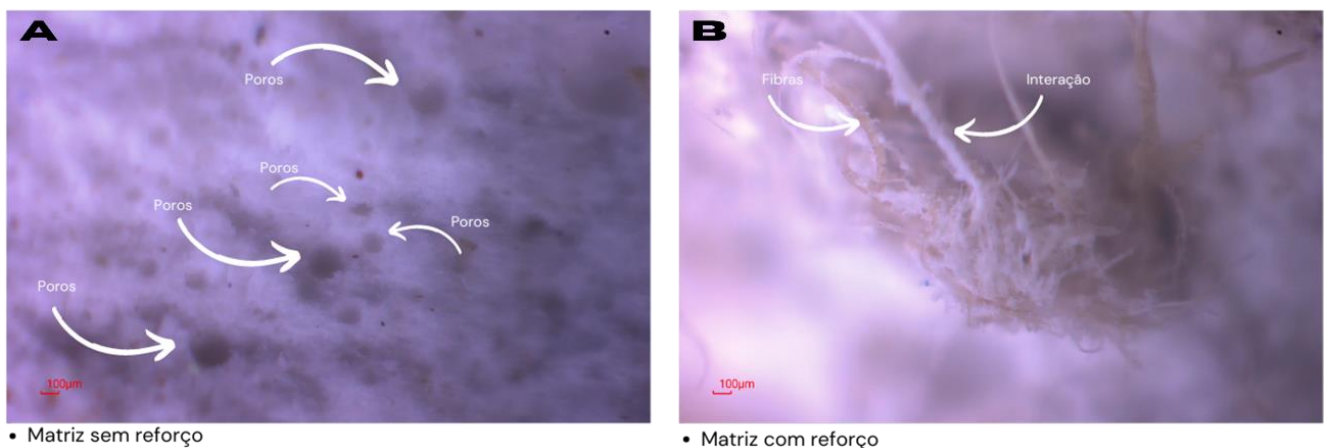


Figura 10. (A) Microscopia ótica realizada em compósitos sem incorporação de reforço. (B) Microscopia ótica realizada em compósitos com a incorporação de resíduos de tubo kraft.

As amostras dos compósitos analisadas pela microscopia ótica auxiliam na compreensão de alguns resultados obtidos. A figura 10 (A), refere-se à produção do compósito referência sem a incorporação de resíduos. Pode ser verificada a criação presença de poros após seu endurecimento de cura, sendo essa uma das características em matrizes cerâmicas de gesso, o que a torna frágil, segundo Callister (2015).

Na figura 10 (B), estão as amostras produzidas com o reforço de resíduos de tubo de papel kraft, em que é possível avaliar a interação das fibras com a matriz de gesso. Um processo ocorrido foi um agrupamento do material celulósico, não homogeneizando no compósito, diminuindo as resistências das propriedades mecânicas. Villela et al. (2020) pesquisando compósitos com a incorporação de embalagens multicamadas observaram o mesmo comportamento das fibras dentro da matriz. Mesquita et al. (2015) trabalharam com a inserção de fibras de sisal na produção de compósitos de gesso e analisaram os mesmos resultados de aglutinação das fibras em imagens de microscopia eletrônica.

Estudos realizados por Villela et al. (2020), mostraram que a incorporação do reforço é uma alternativa viável que, além de promover a sustentabilidade, por meio da logística reversa, diminuiu a densidade do produto final, atendendo à normatização nas propriedades mecânicas de flexão e compressão.

Esse processo então de aglomeração de materiais lignocelulósicos presentes nos resíduos de tubo de papel kraft resultou na dificuldade de interação matriz e reforço, que de acordo com Mesquita et al. (2015), quando as fibras não interagem de maneira homogêneas na matriz, ocorre o aparecimento de poros (espaços vazios), reduzindo as propriedades desejadas.

3.4 Condutividade térmica

A partir da análise realizada para condutividade térmica, observou-se valores similares para as diferentes concentrações de reforço para o nanocompósito, com a concentração de 0,75% apresentando o melhor resultado, de 0,31 W/mK (Figura 11 A). Nos compósitos in natura, houve variação na condutividade térmica em relação ao controle (0%), que apresentou resultado ligeiramente superior em comparação aos demais (Figura 11 A). Segundo Adamy et al. (2016), um material tende reduzir a capacidade de troca de temperatura entre ambientes, indicando que quanto maior for a resistência do material, melhor sua capacidade de isolante térmico.

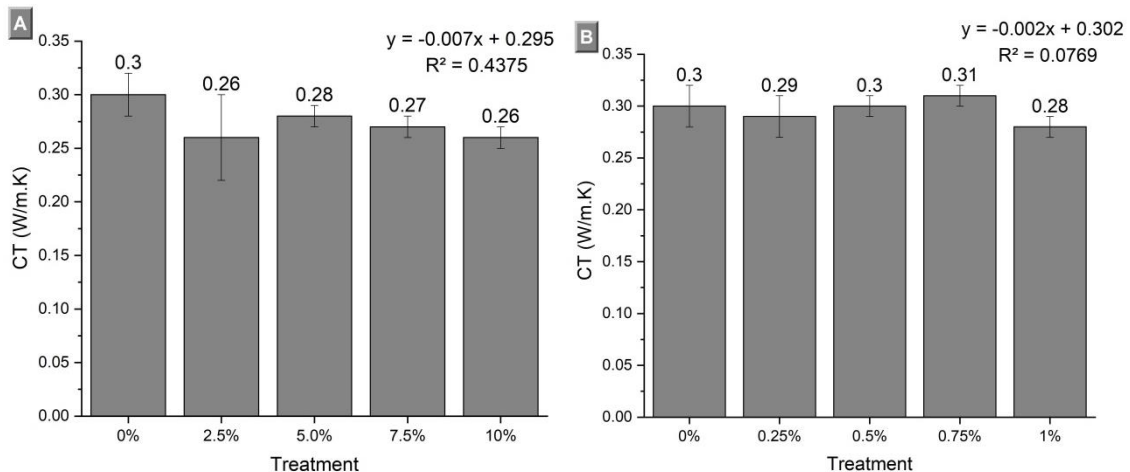


Figura 11. Condutividade térmica, sendo: (A) compósitos (in natura) e (B) nanocompósitos (nanocelulose)

A baixa condutividade térmica observada nos tratamentos com nanocelulose pode ser explicada pelo aumento na quantidade de água na estrutura da nano, o que resulta em menor densidade e maior propagação de poros. De acordo com Antunes et al. (2019), isso leva a uma

menor propagação do calor na superfície e, conseqüentemente, a compósitos com condutividade térmica mais baixa.

No estudo desenvolvido por Villela et al. (2020), foram inseridas na matriz de gesso diferentes porcentagens de reforço, produzidos a partir de embalagens multicamadas trituradas. Os autores verificaram que a inserção do reforço reduziu a condutividade térmica, demonstrando a possibilidade de aplicação em placas ou forros de gesso.

4 CONCLUSÃO

A substituição dos reforços nos compósitos resultou em um produto final mais leve, com melhorias significativas na condutividade térmica e um aumento no módulo de ruptura (MOR). A reutilização do resíduo de tubo de papel kraft em compósitos de gesso demonstrou ser uma alternativa viável para sua incorporação na matriz, promovendo a logística reversa e evitando o descarte inadequado no meio ambiente, que poderia gerar impactos negativos. Além disso, essa abordagem revelou novas aplicações para materiais à base de gesso, incluindo placas para forro e vedação, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil.

Do ponto de vista ambiental, essa pesquisa agrega valor ao propor uma solução inovadora para a gestão de resíduos, reduzindo a necessidade de descarte e minimizando a extração de novos recursos naturais. A substituição parcial de materiais convencionais por resíduos reaproveitados pode diminuir a pegada ecológica da indústria de compósitos, incentivando a transição para uma economia mais circular e sustentável.

Com base nos resultados deste estudo, sugere-se a realização de pesquisas futuras voltadas para o desenvolvimento de novas formulações de compósitos e nanocompósitos. A investigação de diferentes concentrações de reforço permitirá compreender melhor o impacto dessas variações nas propriedades mecânicas e térmicas dos materiais. Além disso, a otimização da interação entre a micro/nanocelulose e a matriz de gesso pode aprimorar ainda mais o desempenho estrutural e funcional dos compósitos, consolidando essa alternativa como uma solução técnica e ambientalmente vantajosa.

Acknowledgments: The authors thank the Research Support Foundation of the State of Minas Gerais (FAPEMIG), Higher Education Personnel Improvement Coordination (CAPES) and National Council for Scientific and Technological Development (CNPq). We also thank the

Nucleus of Studies in Forest Nanotechnology (NENF), the Nucleus of Studies in Wood Panels (NEPAM), Graduate Program in Biomaterials Engineering (PPGBIOMAT) and Forest Science Department (DCF) of the Federal University of Lavras, for their support.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnica (2003) Determinação da densidade básica da madeira. NBR 11941, Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnica (2010) Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido. NBR 7989, Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnica (2017) Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinzas) após a incineração a 525 °C. NBR 13999, Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnica. Madeira (2010) Determinação do material solúvel em etanol-tolueno, em diclorometano e em acetona. NBR 14853, Rio de Janeiro.
- ABRELPE. Relatório de resíduos sólidos no Brasil 2022. Disponível em: www.abrelpe.com.br. Acesso em 24/02/2024
- ADAMY, A.P.A., ROSA, F.S., ROSA, L.C., “Desempenho térmico de compósitos à base de talos de girassol em componentes de edificações,” *Espacios*, v. 37, n. 15, 2016.
- ALVES, L. DE S.; PEREIRA, C. H. DE A. F.; FIGUEIREDO, E. J. P.. Estudo da adição de fibras kraft (embalagens de cimento recicladas) nas propriedades químicas e microestruturais de matrizes cimentícias. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 28, n. 2, p. e20230065, 2023.
- ANTUNES, A., FARIA, P., SILVA, V. et al., “Rice husk-earth based composites: A novel bio-based panel for buildings refurbishment,” *Construction and Building Materials*, v. 221, pp. 99-108, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO, NM 23: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, AMN, 2000.
- BALTI, S., BOUDENNE, A., DAMMAK, L., et al., “Mechanical and thermophysical characterization of plaster composites reinforced by different wastes for green building applications”, *Construction & Building Materials*, v. 372, pp. 130840, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130840>
- BHATIA, L., JOHRI, S., AHMAD, R. An economic and ecological perspective of ethanol production from renewable agro waste: a review, *AMB Express*, v. 2, n. 1, p. 65, 2012.
- BORGES, I. O.; MIRANDA, E. H. N.; BRITO, F. M. S.; ALTAFIN, N. C. S.; MENDES, L. M.; JÚNIOR, J. B. G. Potential for use of waste from soybean culture treated with water and sodium hydroxide for production of agglomerated panels. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 2, 2022. DOI: 10.33448/RSD-V11I2.25762.
- BRANDÃO, C.; CARVALHO, R. Métodos dinâmicos aplicados na avaliação de compósito de gesso e manta de sisal. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, v. 4, n. 4, 2019. Disponível em:

<https://periodicos.ifpr.edu.br/index.php?journal=MundiETG&page=article&op=view&path%5B%5D=933>. Acesso em 26 de fevereiro de 2024.

BROWNING B. L. The chemistry of wood. New York: J. Wiley, 689 p. 1963.

DAI, D., FAN, M., “Preparation of bio-composite from wood sawdust and gypsum,” *Industrial Crops and Products*, v. 74, pp. 417-424, Nov. 2015.

DIAS, N. S.; SALADO, G. de C. CONSTRUÇÃO DE QUIOSQUES COM TUBOS DE PAPELÃO EM EVENTOS TEMPORÁRIOS. In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 7., 2021. Anais [...]. [S. l.], 2021. p. 264–271. Disponível em:

<https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3332>. Acesso em: 26 fev. 2024.

DIAS, Nathalia Schimidt; SALADO, Gersa de Cássia. Construções com tubos de papelão: um estudo dos sistemas construtivos durante 2007-2017. 2020.

EUROPEAN COMMITTE OF STANDARDIZATION, EN 13279-2: Plaster binders and plaster plasters. Part 2: Test methods, Bruxelas, CEN, 2006.

EUROPEAN COMMITTE OF STANDARDIZATION, EN 520. Plaster plasterboards. Definitions, requirements and test methods, Bruxelas, CEN, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, CEN, EN 13279-1, Gesso e produtos à base de gesso para a construção; Parte 1: Definições e requisitos, Bruxelas, 2008.

FURTINI, Ana Carolina Corrêa et al. Compósitos laminados de gesso com reforço de polpa celulósica e manta de juta. *Conjecturas*, v. 22, n. 9, p. 257-270, 2022.

GOMES, D. A. C.; MIRANDA, E. H. N.; RESENDE, F. C.; VILLARRUEL, D. C. V.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. Analysis of the influence of wheat residues on gypsum composites. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 2022. DOI:10.1007/s41062-022-01007-3.

GUIMARÃES JUNIOR, J. B.; XAVIER, M. M.; SANTOS, T. S.; PROTÁSIO, T. P.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Inclusão de resíduo da cultura de sorgo em painéis aglomerados de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 36, n. 88, p. 435–442, 2016. DOI: 10.4336/2016.pfb.36.88.1036. (in Portuguese).

GUIMARÃES JÚNIOR, M., BOTARO, V.R., NOVACK, K.M., FLAUZINO NETO, W.P., MENDES, L.M., TONOLI, G.H.D. (2015) Preparation of cellulose nanofibrils from bamboo pulp by mechanical defibrillation for their applications in biodegradable composites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 15:1-18. DOI: 10.1166/jnn.2015.10854.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R. Painéis de madeira reconstituída. Ajir Gráfica e Editora Ltda., 2020. (in Portuguese).

KENNEDY F, PHILLIPS GO, WILLIAMS EPA (1987) Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, ellishor wood. Chichester: E. Horwood, 1130 p.

LIMA, R.C.O. et al. REAPROVEITAMENTO DE PAPEL PARA CONFECÇÃO DE PLACASA DE GESSO. In: CONGEA- CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7º., 2016, Campina Grande, PB. Anais;Campina Grande: IBEAS-Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2016.

LOPES, T. A.; FERREIRA, R. L.; GARCIA, H. V. S.; BRITO, F. M. S.; MENDES, L. M.; JÚNIOR, J. B. G. Compósitos minerais produzidos com matriz de gesso e reforçados com resíduos de algodão (*Gossypium herbaceum* L.) / Mineral composites produced with gypsum matrix and reinforced with cotton waste (*Gossypium herbaceum* L.). *Brazilian Journal of Development*, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 19205–19225, 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n3-252. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/45356>. Acesso em: 26 fev. 2024.

MENDES, R. F. et al. Study of new reinforcing materials for cementitious panel production. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, p. 37217-37230, 2021.

MESQUITA JÚNIOR, L., FARIA, D. L., GUIMARÃES JÚNIOR, J. B., EUGÊNIO, T. M. C., FERREIRA, S. R., RABELO, G. F. Compósitos à base de cimento e gesso reforçados com partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, *Revista da Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018, v. 9, n. 3, p. 191-198, 2018.

MIRANDA, E. H. N.; GOMES, D. A. C.; RESENDE, G. M. C. S.; GUIMARÃES, T. C.; MENDES, L. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; MIRANDA, E. H. N. Evaluation of the influence of the addition of bean residue in gypsum matrices. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2022, v. 1, p. 1–11, 2022. DOI: 10.1007/S10098-022-02389-9.

Oliveira, A. S., Villela, L. S., Veloso, M. C. R. A., Silva, D. W., Mendes, L. M., & Guimarães Junior, J. B. (2020). Compósitos com matriz de gesso reforçada com fibras de madeira de eucalipto. *Scientia Forestalis*, 48(127), e3260. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.23>

OLIVEIRA, A. S., VILLELA, L. S., VELOSO, M. C. R. A., SILVA, D. W., MENDES, L. M., JÚNIOR, J. B. G. Compósitos com matriz de gesso reforçada com fibras de madeira de eucalipto. *Scientia Forestalis*, 48(127), e3260, 2020.

PICCOLI, Mariana, Joyson PACHECO, Leonardo Barili BRANDI, Estudo das propriedades mecânicas dos tubos de papelão visando sua utilização no design de produtos, 13º Congresso Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Blucher Design Proceedings, Volume 6, 2019, Pages 100-114, ISSN 2318-6968, http://dx.doi.org/10.1016/ped2018-8.2_ACO_11

PROTÁSIO, T. P., BUFALINO, L., GUIMARÃES JÚNIOR, M., TONOLI, G. H. D., TRUGILHO, P. F. Técnicas multivariadas aplicadas a avaliação de resíduos lignocelulosicos para a produção de bioenergia, *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 771-781, 2013.

RAABE J, FONSECA AS, BUFALINO L, RIBEIRO C, MARTINS MA, MARCONCINI JM, MENDES LM, TONOLI GHD (2015) Biocomposite of cassava starch reinforced with cellulose pulp fibers modified with deposition of silica (SiO₂) nanoparticles. *Journal of Nanomaterials* 2015 493-439. <https://doi.org/10.1155/2015/493439>.

ROCHA, Osilene dos Santos ; SILVA, A. C. ; Sá, G. G . APLICAÇÃO SUSTENTÁVEL DA FIBRA DO BABAÇU COMO ISOLAMENTO ACÚSTICO EM PAINÉIS DE GESSO. In: XVII CINPAR 2021: Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções

XVII, 2021, Fortaleza. Caderno de Resumo do XI Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas ? São Leopoldo/RS, 2021.

RUEDEN, C.T., SCHINDELIN, J., HINER, M.C., DEZONIA, B.E., WALTER, A.E., ARENA, E.T., ELICEIRI, K.W. (2017) ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*. DOI: 10.1186/s12859-017-1934-z

SALINO, Rita Estela et al. Novos compósitos de gesso a partir da reciclagem. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 1302-1321, 2021.

SCATOLINO, M. V.; SILVA, D. W.; MENDES, R. F.; MENDES, L. M. Use of maize cob for production of particleboard. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 37, n. 4, p. 330–337, 2013. DOI: 10.1590/S1413-70542013000400006.

TROCINSKI, A. et al. Properties of fiber-gypsum composite formed on the basis of hemp (*Cannabis sativa L.*) fibers grown in Poland and natural gypsum. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Forestry and Wood Technology*, v. 121, 2023.

VELOSO, M. C. R. A., VILLELA, L. S., JÚNIOR, L. M., VALLE, M. L. A., MENDES, L. M., GUIMARÃES JÚNIOR, J. B. Produção e caracterização de compósitos à base de gesso reforçado com partículas de resíduo da agroindústria do cacau, *Revista Matéria*, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, 2021.

VELOSO, M. C. R. A.; SCATOLINO, M. V.; GONÇALVES, M. M. B. P. et al. Sustainable valorization of recycled low-density polyethylene and cocoa biomass for composite production. *Environ Sci Pollut Res* 28, 32810–32822, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13061-y>.

VELOSO, Maria Cecília Ramos de Araújo et al. Produção e caracterização de compósitos à base de gesso reforçado com partículas de resíduo da agroindústria do cacau. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, p. e12945, 2021.

VENKATESAN, Srikanth et al. Circular-Economy-Based Approach to Utilizing Cardboard in Sustainable Building Construction. *Buildings*, v. 13, n. 1, p. 181, 2023.

VILLELA, Luciana Silva et al. Desempenho físico-mecânico de compósitos à base de gesso reforçados com embalagens multicamadas trituradas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 25, 2020.

WEBER, A. M., CECHIN, L., TOKARSKI, R. B., MATOSKI, A. Análise da influência do traço nas propriedades do compósito cimento-madeira, *Revista Principia, Paraíba*, v. 1, n. 36, p. 50-59, 2017.

Almeida, R.O., Ramos, A., Alves, L., Potsi, E., Ferreira, P.J.T., Carvalho, M.G.V.S., Rasteiro, M.G., Gamelas, J.A.F., 2021. Production of nanocellulose gels and films from invasive tree species. *International Journal of Biological Macromolecules* 188, 1003–1011. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.015>

Mendoza, L., Batchelor, W., Tabor, R.F., Garnier, G., 2018. Gelation mechanism of cellulose nanofibre gels: A colloids and interfacial perspective. *Journal of Colloid and Interface Science* 509, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.08.101>

Vadodaria, S.S., Onyianta, A.J., Sun, D., 2018. High-shear rate rheometry of micro-nanofibrillated cellulose (CMF/CNF) suspensions using rotational rheometer. *Cellulose* 25, 5535–5552. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1963-4>

Wu, T., Kummer, N., De France, K.J., Campioni, S., Zeng, Z., Siqueira, G., Dong, J., Nyström, G., 2021. Nanocellulose-lysozyme colloidal gels via electrostatic complexation. *Carbohydrate Polymers* 251, 117021. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117021>

Zakani, B., Grecov, D., 2020. Yield stress analysis of cellulose nanocrystalline gels. *Cellulose* 27, 9337–9353. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03429-7>

Zhang, B., Sun, B., Li, X., Yu, Y., Tian, Y., Xu, X., Jin, Z., 2015. Synthesis of pH- and ionic strength-responsive microgels and their interactions with lysozyme. *International Journal of Biological Macromolecules* 79, 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.05.011>

YANG, G. et al. Comparison of Effects of Sodium Chloride and Potassium Chloride on Spray Drying and Redispersion of Cellulose Nanofibrils Suspension. *Nanomaterials*, v. 11, n. 2, p. 439, fev. 2021.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. O gesso: produção e utilização na construção civil. Recife: Bagaço, 2001.

5 CONCLUSÃO DA DISSERTAÇÃO E SUGESTÕES DE ESTUDOS

Os elementos construtivos à base de gesso apresentam vantagens como rápido endurecimento, resistência ao fogo e eficiência acústica e térmica, mas possuem limitações devido à sua porosidade e baixa resistência mecânica, restringindo seu uso a ambientes internos. Para superar essas limitações, este estudo avaliou a incorporação de resíduos lignocelulósicos industriais e micro/nanofibrilas de celulose provenientes de tubos de papel kraft em compósitos de gesso, considerando suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Os resultados demonstraram que a incorporação desses reforços promoveu um aumento na absorção de água, atingindo até 87% em nanocompósitos, e na massa específica aparente, além de uma melhoria na condutividade térmica. Apesar da redução na resistência à flexão, os valores permaneceram dentro dos limites normativos, indicando viabilidade estrutural. A reutilização desses resíduos industriais reforça o conceito de logística reversa, reduzindo impactos ambientais associados ao descarte inadequado e promovendo a economia circular na construção civil. No contexto social e econômico, a adoção dessa tecnologia pode incentivar práticas mais sustentáveis no setor, fomentar a valorização de resíduos como insumos para novos materiais e estimular a geração de renda em setores ligados à reciclagem e ao aproveitamento de subprodutos industriais. Os impactos tecnológicos incluem a possibilidade de desenvolvimento de novos compósitos de gesso com propriedades otimizadas para diferentes aplicações, contribuindo para a diversificação de materiais na construção civil e incentivando a pesquisa e inovação em materiais sustentáveis. A viabilidade da substituição parcial do gesso por reforços lignocelulósicos e micro/nanofibrilas de celulose provenientes de resíduos demonstra um potencial significativo para a redução do consumo de recursos naturais e para a mitigação dos impactos ambientais do setor, promovendo um modelo produtivo mais alinhado com princípios de sustentabilidade e economia circular. O presente trabalho investigou a incorporação de resíduo lignocelulósico industrial e micro/nanofibrilas de celulose provenientes de tubos de papel kraft em compósitos de gesso, visando melhorar suas propriedades físicas e térmicas. Os impactos sociais, tecnológicos, econômicos e ambientais do estudo apresentam tanto caráter concreto, quanto potencial, com relevância para diferentes setores da sociedade. Do ponto de vista tecnológico, os resultados indicaram a viabilidade da substituição parcial do gesso por reforços lignocelulósicos, contribuindo para o avanço de materiais sustentáveis na construção civil. A melhoria na condutividade térmica e a manutenção da resistência mecânica dentro dos padrões normativos demonstram potencial para aplicações em revestimentos e divisórias, promovendo eficiência energética e menor consumo de materiais convencionais. No âmbito

social e econômico, a utilização de resíduos industriais para reforço do gesso fortalece o conceito de logística reversa e economia circular, reduzindo desperdícios e fomentando a valorização de resíduos como insumos para novos materiais. Essa abordagem pode gerar oportunidades para setores ligados à reciclagem e reaproveitamento de subprodutos industriais, impactando diretamente trabalhadores e empresas desse segmento. Além disso, ao promover a sustentabilidade na construção civil, o trabalho pode incentivar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento de materiais ecologicamente corretos e ao estímulo à inovação em indústrias do setor. O impacto ambiental do estudo é significativo, pois a reutilização de resíduos industriais reduz a quantidade de material descartado de maneira inadequada, minimizando impactos negativos ao meio ambiente. Esse aspecto alinha-se ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12 da Organização das Nações Unidas (ONU), que trata do consumo e produção responsáveis, bem como ao ODS 9, que incentiva a inovação e infraestrutura sustentável. No contexto da Política Nacional de Extensão, os impactos do trabalho se inserem principalmente na área temática de tecnologia e produção, ao desenvolver novos materiais e processos para a construção civil, e também no meio ambiente, ao propor alternativas sustentáveis para a destinação de resíduos industriais.

A partir dos resultados obtidos, é possível observar uma tendência positiva ao utilizar

Esse resíduo em diversas matrizes como foi na aplicação de matriz de gesso. Entretanto, novos estudos na área precisam ser desenvolvidos para melhorar sua resistência, um exemplo seria investigar novas formulações para compósitos e nanocompósitos buscando avaliar diferentes concentrações de reforços, com o intuito de melhorar as propriedades físicas e mecânicas. Por fim, sugere-se também a aplicação do gel desenvolvido em outras matrizes, visando atender e compreender melhor sua utilização em diversos âmbitos assim como da construção civil.